



Gonçalo Marques Dionísio

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Proposta de um Sistema de Monitorização de Condição de Motores Diesel

Dissertação para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Orientador: Engenheiro Mário José Martinez de Almeida Santos

Co-orientador: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado da Faculdade
de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente:

Doutor João Manuel Vicente Fradinho, Professor Auxiliar da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade nova de Lisboa

Vogais:

Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho, Professor Auxiliar da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Engenheiro Mário José Martinez de Almeida Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2017

Gonçalo Marques Dionísio

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Proposta de um Sistema de Monitorização de Condição de Motores Diesel

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Engenheiro Mário José de Almeida Santos

Co-orientador: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado da
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri

Presidente:

Doutor João Manuel Vicente Fradinho, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade nova de Lisboa

Vogais:

Doutor Alberto José Antunes Marques Martinho, Professor Auxiliar da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Engenheiro Mário José Martinez de Almeida Santos

Setembro, 2017

Proposta de um Sistema de Monitorização de Condição de Motores Diesel

Copyright © 2017 Gonçalo Marques Dionísio

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível sem a contribuição de inúmeras pessoas às quais desejo agradecer:

Ao meu orientador, Engenheiro Mário Almeida Santos, pela sua dedicação e interesse demonstrados ao longo das etapas deste trabalho e por todas as pertinentes críticas, correções e sugestões feitas.

Ao meu co-orientador, Professor Doutor António Mourão pela proposta deste tema e por toda a preocupação, disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

Ao Engenheiro António Magriço, por toda a ajuda e esclarecimento prestado ao longo deste trabalho.

À Joana, por todo o apoio força, carinho e amor que me deu ao longo deste trabalho dando-me força para seguir e acreditar que era capaz.

A todos os meus amigos que a faculdade me trouxe, pela ajuda nos momentos mais difíceis e pelos bons momentos vividos ao longo destes últimos anos.

À minha mãe que mesmo já não estando cá, fez de mim a pessoa que sou hoje e foi uma motivação e força de vontade para completar esta etapa da minha vida.

Ao meu pai, que duma forma heroica fez-me ser a pessoa que sou hoje, pelo apoio que me deu sempre que precisei e por me ter dado o privilégio de ter estudado e completado este percurso académico. O mais sincero e sentido obrigado.

A minha família por toda a ajuda, carinho e apoio que me deram ao longo dos meus anos de vida académica.

Resumo

A crescente competitividade e exigência do mercado da indústria, fez com que as empresas tenham sempre de reduzir custos, nomeadamente no ramo da manutenção. Para empresas deste ramo, que usam maquinaria como fonte de rendimento, os custos em manutenção e reparação de avarias das mesmas representam uma fatia significativa das suas despesas. As avarias são também uma fonte de insatisfação para os clientes e com grande prejuízo para a imagem da empresa. Para tal, surgiu a necessidade de fazer uma manutenção mais eficiente, em tempo certo e com menos custos que permitisse prever estas avarias aumentando assim a rentabilidade da empresa. Neste contexto, o presente trabalho dedicou-se ao estudo da monitorização de condição de motores diesel. Para tal foi necessário fazer um estudo do processo de fabrico do combustível diesel e lubrificantes, a sua evolução ao longo do tempo bem como um levantamento das novas tecnologias envolvidas e avarias mais frequentes em motores deste tipo.

Após estudo realizado, e em articulação com a empresa Grupo VENDAP, foi feita uma análise a uma base de dados que continha as avarias da frota e frequência com que ocorreram. Recorreu-se à metodologia dos 5 P's para averiguar os parâmetros a serem monitorizados das avarias mais frequentes e dispendiosas para a empresa, que corresponderam a cerca de 80% das avarias nos motores. Neste seguimento, foram propostos três sistemas de monitorização, compostos por aparelhos de análise de lubrificante, análise de vibrações e análise termográfica. Feito um estudo custo/benefício da implementação destes sistemas, concluiu-se que a **Proposta 2** (aparelhos *FluidScan Q1000*, *Fluke 805* e *Flir One*), apesar de apresentar custos não recorrentes superiores à **Proposta 1**, revelou-se mais viável a ser aplicável para o prazo de amortização de investimento de dois anos.

Palavras-chave

Monitorização de condição

Motor diesel

Lubrificante

Avarias

Análise custo-benefício

Abstract

The increasing competitiveness and high standards of the mechanical industry led companies to reduce costs, especially in the maintenance sector. For companies of this field, which use machinery as a source of income, the costs of maintenance and repair of the equipment represent a significant portion of their expenses. Malfunctions are also a source of dissatisfaction for costumers, which leads to a bad reputation for the company. Thus, the need has arisen for a more efficient maintenance, done at the right time, faster and with fewer costs, which allows the prediction of the equipment's faults, thus increasing the profitability of the company. In this context, the present work was devoted to the study of condition monitoring of diesel engines. This required a study of the manufacturing process of diesel fuel and lubricants, their evolution over the years, the study of the new technologies involved as well as the most frequent failures of this type of engine.

After a study has been conducted, and along with the company VENDAP Group, an analysis has been made to a database that contained the malfunctions of the fleet and how often they occurred. The 5 Whys methodology was used to determine the parameters of the most frequent and most expensive malfunctions to the company, which corresponded to 80% of the engines' malfunctions. Three monitoring systems have been proposed, which were composed by devices that analyzed the lubricant, the vibrations and the thermography. A study about the cost-benefit of the implementation of these systems concluded that Proposal 2 (FluidScan Q1000, Fluke 805 and Flir One devices), although it presents higher non-recurrent costs than Proposal 1, it proved to be more feasible to be applied within the investment amortization period of two years.

Keywords

Condition monitoring

Diesel engine

Lubricant

Failures

Cost-Benefit analysis

Índice

Agradecimentos.....	V
Resumo.....	VII
Palavras-chave.....	VII
Abstract.....	IX
Keywords	IX
Índice de Figuras.....	XIII
Índice de Tabelas	XV
Siglas	XVII
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. A Empresa	4
2. Motor Diesel.....	5
2.1. Sobre o Funcionamento	5
2.2. Lubrificantes em Motores Diesel	12
2.2.1. O Óleo de Motor	12
2.2.2. Evolução da Refinação de Óleos Base	13
2.2.3. Propriedades Físicas do Óleo de Motor	17
2.2.4. Aditivos nos Lubrificantes.....	19
2.3. Combustível em Motores Diesel.....	21
2.3.1. Produção	21
2.3.2. Composição	25
2.3.3. Aditivos.....	25
2.3.4. Normas Aplicadas ao Gasóleo.....	27
3. Manutenção Condicionada.....	29
3.1. O Conceito	29
3.2. Falhas em Motores Diesel	31
3.2.1. Falhas em Equipamentos de Injeção de Combustível	31
3.2.2. Degradação da Camada Lubrificante das Válvulas	35
3.2.3. Falha de Apoios da Cambota	39
3.2.4. Estatística das Falhas Mais Comuns	45
3.3. Possíveis Métodos de Monitorização	47
3.3.1. Análise do Óleo de Motor.....	47
3.3.2. Termografia Infravermelha.....	54
3.3.3. Pressão no Cilindro	56
3.3.4. Pressão, Temperatura e Consumo de Óleo	58
3.3.5. Pressão na Injeção de Combustível	58
3.3.6. Temperatura do Pistão	59
3.3.7. Análise de Vibrações	59
3.3.8. Outros parâmetros.....	60
4. Proposta de Sistema de Monitorização	61
4.1. Estatísticas de Avarias da Frota da Empresa.....	61

4.2. Equipamentos de Análise de Lubrificante	63
4.2.1. SKF TMEH 1	63
4.2.2. <i>FluidScan® 1000 Series Spectro Scientific</i>	65
4.2.3. <i>MicroLab Series Spectro Scientific</i>	68
4.2.4. Periodicidade de Análise de Lubrificantes	72
4.3. Equipamentos de Análise Termográfica	75
4.3.1. <i>Flir One/Flir One Pro</i>	75
4.4. Equipamentos de Análise de Vibrações.....	79
4.4.1. <i>Fluke 805</i>	79
4.5. Análise Custo-Benefício	82
5. Conclusões e Propostas Futuras	89
Bibliografia	93
Apêndices	97
Apêndice A – Diagrama 5 Porquês das avarias	97
Apêndice B – Avarias vs parâmetros de monitorização.....	110
Anexos	111
Anexo A – Exemplo de relatório impresso pelo <i>MicroLab</i>	111
Anexo B – Periodicidade de testes de lubrificante em função do equipamento segundo CIMAC.	112
Anexo C – Plano atual de manutenção do Grupo VENDAP.....	113

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Classificação dos vários tipos de manutenção, adaptado de [2].	1
Figura 1.2 – Curva da banheira, adaptado de [38].	2
Figura 1.3 – Sequência das principais etapas de um sistema de monitorização de condição.	2
Figura 1.4 – Logótipo do Grupo VENDAP [39].	4
Figura 2.1 – Ciclo diesel (à esquerda) e <i>Otto</i> a gasolina (à direita) representados em diagrama P-V, adaptado de [40][41].	6
Figura 2.2 – Ciclo diesel (à esquerda) e Ciclo <i>Otto</i> a gasolina (à direita) representados em diagrama T-S, adaptado de [42] e [43].	7
Figura 2.3 – Principais componentes do motor a diesel (à esquerda) e a gasolina (à direita) [44].	7
Figura 2.4 – Sistema <i>EGR- Exhaust Gas Recirculation</i> , adaptado de [46].	9
Figura 2.5 – Sistema de injeção <i>Common Rail</i> , adaptado de [45].	9
Figura 2.6 – Catalisador de um motor diesel, adaptado de [47].	10
Figura 2.7 – Representação do interior de um catalisador [48].	10
Figura 2.8 – Esquema de funcionamento do interior de um filtro de partículas [49].	11
Figura 2.9 – Tendência do <i>Hydrocracking</i> na América do Norte, adaptado de [7].	16
Figura 2.10 – Esquema simplificados de uma instalação de destilação de petróleo, adaptado de [38].	22
Figura 3.1 – Diagrama P-F representação do decaimento de condição, adaptado de [50].	29
Figura 3.2 – Efeito do teor de oxigénio no combustível na emissão de NO _x para rotações: ■ 1200 rpm; ♦ 2000 rpm, adaptado de [4].	30
Figura 3.3 – Pistão agarrado [17].	31
Figura 3.4 – Injetor <i>Common Rail Bosch</i> em pormenor, adaptado de [51].	32
Figura 3.5 – Agulhas de injetor descoloradas [17].	32
Figura 3.6 – Arranhões na agulha do injetor [17].	33
Figura 3.7 – Pulverização deficiente de um injetor [17].	34
Figura 3.8 – Coroa de pistão danificada [17].	35
Figura 3.9 – Esquema das causas de falha de apoios de cambota, adaptado de [24].	40
Figura 3.10 – Causas do desgaste adesivo dos apoios de cambota, adaptado de [24].	40
Figura 3.11 – Causas do desgaste abrasivo dos apoios de cambota, adaptado de [24].	41
Figura 3.12 – Causas do desgaste por atrito dos apoios de cambota, adaptado de [24].	41
Figura 3.13 – Causas do desgaste corrosivo dos apoios de cambota, adaptado de [24].	42
Figura 3.14 – Causas do desgaste erosivo dos apoios de cambota, adaptado de [24].	42
Figura 3.15 – Causas do desgaste por fadiga da superfície dos apoios da cambota, adaptado de [24].	43
Figura 3.16 – Causas do desgaste por cavitação dos apoios de cambota, adaptado de [24].	43
Figura 3.17 – Causa da falha mecânica dos apoios de cambota, adaptado de [24].	44
Figura 3.18 – Comparação entre os diferentes tipos de teste para a deteção de partículas presentes num lubrificante, adaptado de [26].	53
Figura 3.19 – Decaimento das propriedades do lubrificante ao longo do tempo de uso, adaptado de [26].	54
Figura 3.20 – Espectro eletromagnético e respetivos comprimentos de onda [52].	55
Figura 3.21 – Falha na ignição de um cilindro de um motor diesel [53].	56
Figura 3.22 – Rolamento em sobreaquecimento [53].	56
Figura 3.23 – Aplicação do filtro de <i>Wiener</i> ao sinal recebido, adaptado de [54].	57

Figura 3.24 – Forma de onda do torque da cambota, resultante da ação do volante do motor, adaptado de [55].	58
Figura 3.25 – Sensor de pressão <i>clamp-on</i> [56].	58
Figura 3.26 – FLUKE 805- equipamento de medição de vibrações [37].	60
Figura 4.1 – <i>SKF TMEH 1</i> [31].	64
Figura 4.2 – <i>FluidScan Q1000</i> [32].	66
Figura 4.3 – <i>MicroLab Series Spectro Scientific</i> [33].	68
Figura 4.4 – Comparação entre o <i>MicroLab 30</i> e o <i>MicroLab 40</i> , adaptado de [33].	70
Figura 4.5 – Folha de cálculo de periodicidade de análise de lubrificante segundo <i>NORIA Corp.</i> [34].	72
Figura 4.6 – Periodicidade de análise de lubrificante segundo a <i>Spectro Scientific</i> [36].	73
Figura 4.7 – Copos para recolha de amostra de lubrificante [57].	74
Figura 4.8 – Pipetas descartáveis[58].	75
Figura 4.9 – LOCTITE SF 7070	75
Figura 4.10 – Comparação entre as imagens de uma porta obtidas pela <i>Flir One</i> e <i>Flir One Pro</i> [59].	76
Figura 4.11 – <i>Flir One</i> [59].	77
Figura 4.12 – Comparação entre as câmaras <i>Flir One</i> e <i>Flir One Pro</i> [59].	77
Figura 4.13 – Especificações técnicas da <i>Flir One</i> [59].	78
Figura 4.14 – <i>Fluke 805</i> [37].	79
Figura 4.15 – Características técnicas <i>Fluke 805</i> [37].	81
Figura 5.1 – <i>Template</i> do <i>software OMR FormeRead</i> .	91
Figura 5.2 – <i>QR CODE</i> com indicação para o site do Grupo VENDAP	92

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Normas europeias de emissões para veículos diesel, adaptado de [5].	12
Tabela 2.2 – Grupos de óleos base, segundo a API (<i>American Petroleum Institute</i>), adaptado de [3].	15
Tabela 2.3 – Óleos de motor: tipos de aditivos, compostos químicos e sua respetiva função, adaptado de [3].	19
Tabela 2.4 – Percentagem de enxofre por peso do gasóleo em função da sua origem, adaptado de [3].	23
Tabela 2.5 – Composição do gasóleo em função do processo de refinação a partir do qual foi obtido, adaptado de [3].	24
Tabela 2.6 – Requisitos e métodos de testes geralmente aplicado na EN 590, adaptado de [15].	28
Tabela 3.1 – Lista das falhas de motores diesel e a sua percentagem de ocorrência, adaptado de [25].	45
Tabela 3.2 – Falhas e respetivos sinais a ser medidos e organizados por componentes, adaptado de [16].	46
Tabela 3.3 – Contaminação do óleo de motor diesel [27].	49
Tabela 3.4 – Tabela de causa-efeito em função das medições e testes realizados, baseado [28].	50
Tabela 3.5 – Fontes de partículas de desgaste detetadas na espectrometria, adaptado de [29].	51
Tabela 3.6 – Fontes de partículas de desgaste em suspensão no lubrificante detetadas na ferrografia, adaptado de [29].	52
Tabela 4.1 – Estatística das falhas ocorridas entre 1994 e 2014 nos motores que compõem a frota da empresa.	62
Tabela 4.2 – Especificações técnicas <i>SKF TMEH 1</i> , adaptado de [31].	64
Tabela 4.3 – Especificações técnicas do <i>FluidScan® Q1000</i> , adaptado de [32].	67
Tabela 4.4 – <i>Output</i> do <i>MicroLab 30</i> e <i>MicroLab 40</i> , adaptado de [33].	71
Tabela 4.5 – Cálculo do número de análises ao lubrificante a realizar durante dois anos.	84
Tabela 4.6 – Cálculo de custos recorrentes da Proposta 1.	85
Tabela 4.7 – Cálculo de custos recorrentes da Proposta 2.	85
Tabela 4.8 – Cálculo do total de custos da Proposta 1 e da Proposta 2.	85
Tabela 4.9 – Tabela representativa das falhas ocorridas durante dois anos e respetivos custo de reparação.	86
Tabela 4.10 – Balanço custo-benefício da Proposta 1 e da Proposta 2.	87

Siglas

5 P's	5 Porquês
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ATR	<i>Attenuated total reflectance</i>
CEN	Comité Europeu Normalização
CFPP	<i>Cold Filter Plugging Point</i>
CIMAC	<i>The International Council On Combustion Engines</i>
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
EGT	<i>Exhaust Gas Temperature</i>
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Ester</i>
GTP	<i>Gas-to-liquid</i>
HTHS	<i>High temprature/High shear</i>
IV	Índice de viscosidade
OMR	<i>Optical Mark Recognition</i>
PAO	<i>Polyalphaolefins</i>
RPM	Rotações por minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SI	Sistema internacional
SMDS	<i>Shell Middle Distillate Synthesis</i>
TAN	<i>Total acid number</i>
TBN	<i>Total base number</i>
TC	Taxa de compressão
TI	Termografia por infravermelhos
VI	<i>Viscosity index</i>

1. Introdução

1.1. Motivação

Para empresas do ramo industrial, as máquinas são um dos pilares para o seu pleno funcionamento, sendo que a falha das mesmas representa um elevado prejuízo económico e, para o evitar, deve ser prestado um serviço de manutenção a estas máquinas segundo as normas estabelecidas pelo fabricante desta. A norma europeia EN 13306:2010 define a manutenção como sendo uma combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem com o objetivo de mantê-lo ou repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida. O principal objetivo da manutenção é, então, corrigir e tentar antecipar determinadas falhas fazendo com que o seu tempo de vida do equipamento e eficiência sejam maximizados.

Nos últimos anos e devido à crescente competição do mercado, a indústria tem dedicado uma atenção especial à manutenção considerando que esta pode ser uma fonte de lucro e não somente uma fonte de despesa [1]. Segundo Veldman *et al.*[2] os diferentes tipos de manutenção podem ser divididos como sugere a Figura 1.1.

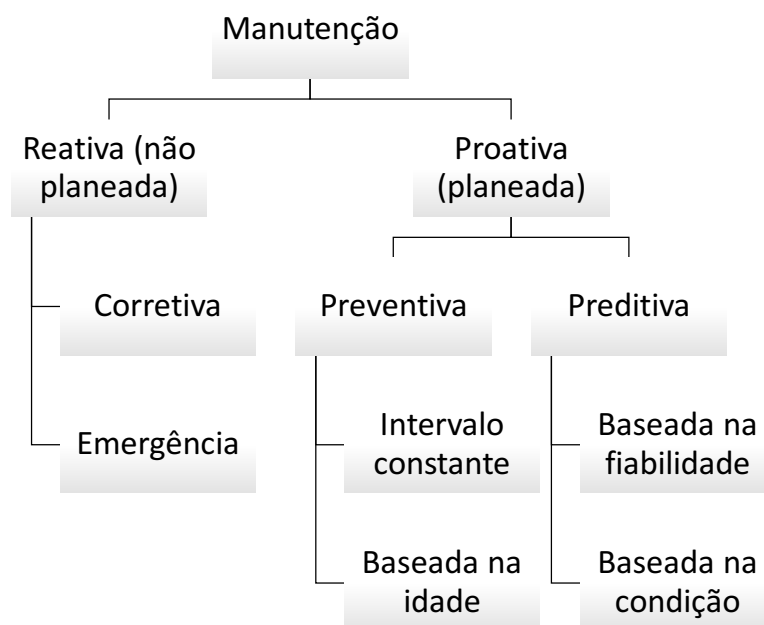


Figura 1.1 – Classificação dos vários tipos de manutenção, adaptado de [2].

De uma forma geral podemos dividir os tipos de manutenção entre não planeada, também chamada de reativa e planeada chamada também de proactiva. A manutenção não planeada é aquela que é realizada quando ocorre uma falha e a intervenção deve ser realizada para recuperar a condição original ou a manutenção de emergência que é realizada para evitar situações de falta de segurança. Quanto à manutenção planeada ou proactiva podemos dividi-la em manutenção preventiva e preditiva. Na manutenção preventiva existem dois tipos de manutenção, a manutenção realizada em intervalos constantes, a manutenção baseada na idade do equipamento. A manutenção preventiva tem por base uma estatística chamada de “tempo médio de falha” ou “curva da banheira” que pode ser visualizada na Figura 1.2. Na manutenção preditiva existem dois tipos a manutenção baseada na fiabilidade e a baseada na condição (Figura 1.3). Nesta dissertação será dado ênfase à manutenção baseada na condição.

Na manutenção baseada na condição são utilizadas técnicas de monitorização de condição para determinar se existe algum problema no equipamento, quão grave é o problema e quanto tempo o equipamento pode operar antes de atingir a falha.

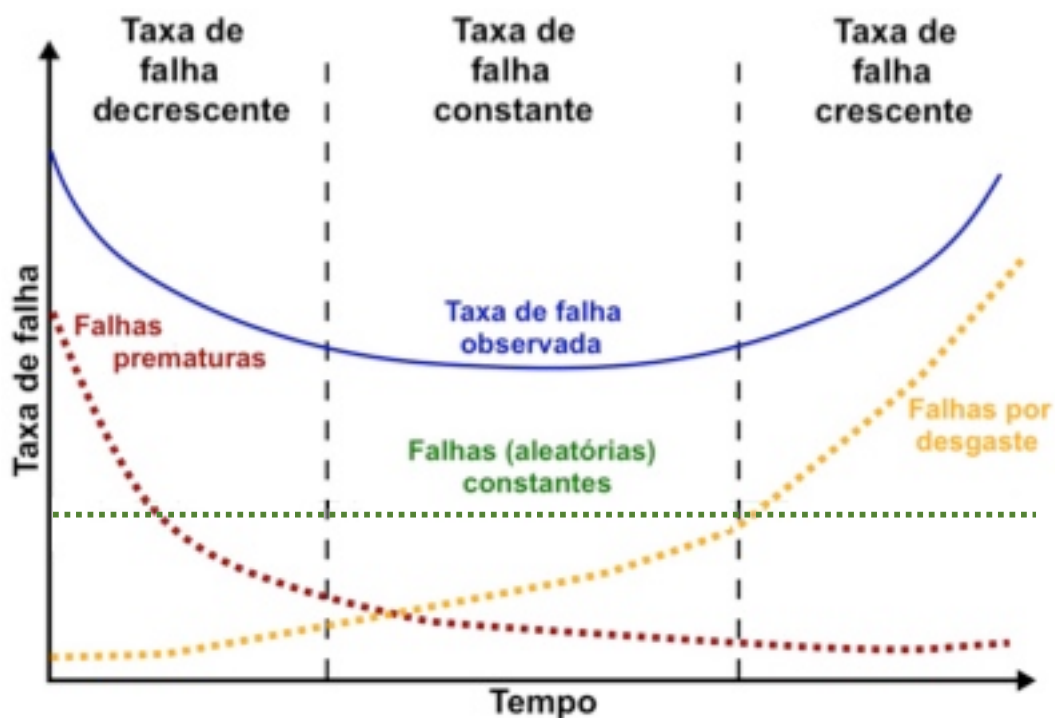


Figura 1.2 – Curva da banheira, adaptado de [38].

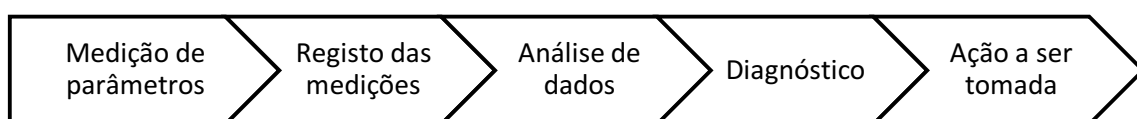


Figura 1.3 – Sequência das principais etapas de um sistema de monitorização de condição.

1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo desenvolver um sistema de monitorização de condição a ser aplicado em motores diesel. Pretende-se que este sistema seja utilizado em motores diesel de médio porte utilizado em gruas pelo Grupo VENDAP. Espera-se, com este sistema de monitorização, evitar falhas graves nos motores, reduzir o tempo de paragem para manutenção e reduzir o número de intervenções, resultando assim numa redução de custos significativa para a empresa.

1.3. A Empresa

O Grupo VENDAP, sediado em Porto Alto e com delegações no Porto, Pombal, Sines, Faro e no estrangeiro, dedica-se ao aluguer de gruas, plataformas elevatórias, empilhadores, geradores, compressores, sanitários, módulos e contentores, equipamentos para movimentação de terras e andaimes. Com mais de 30 anos de experiência, garante um serviço de excelência, personalizado e económico.

Esta dissertação será realizada em articulação com o Grupo VENDAP, com o objetivo da criação de um sistema de monitorização de condição de motores diesel passível de ser aplicado na frota de gruas, geradores e compressores do grupo.



Figura 1.4 – Logótipo do Grupo VENDAP [39].

2. Motor Diesel

Neste capítulo pretende-se apresentar os principais conceitos dos motores diesel, dos lubrificantes do motor diesel e do combustível diesel que fundamentam a monitorização de condição desse tipo de motores. Fazendo também referência à evolução dos lubrificantes, do seu combustível (gasóleo) e dos próprios motores que se observaram nos últimos anos muito por causa das crescentes preocupações ambientais e eficiência.

2.1. Sobre o Funcionamento

O motor diesel, cuja designação mais correta é motor de ignição por compressão, é um motor de combustão interna criado por Rudolf Diesel em 1892.

A ignição do combustível (gasóleo), que é diretamente injetado na câmara de combustão, é consequência da alta temperatura a que o gás (ar) se encontra após a sua compressão adiabática [3].

Por vezes é comum encontrarem-se velas de incandescência que pré-aquecem, no arranque, a câmara de combustão para auxiliar a ignição do combustível em dias mais frios ou em motores com menor taxa de compressão. Contrariamente, os motores de ignição comandada (motores a gasolina) recorrem a velas de ignição para garantir a explosão da mistura de ar e combustível.

O motor diesel torna-se mais eficiente que os motores a gasolina devido a algumas diferenças no seu funcionamento como por exemplo [4]:

- A combustão nos motores diesel dá-se a pressão constante ao contrário dos motores a gasolina em que a combustão ocorre a volume constante, isto resulta numa combustão mais eficiente, havendo menos perdas de calor e mais realização de trabalho
- Num motor a gasolina é admitido para a câmara de combustão uma mistura de ar e combustível que posteriormente é detonada pelas velas de ignição. Durante a compressão é possível que ocorra pré-ignição devido às temperaturas atingidas uma vez que a gasolina apresenta um ponto de inflamação mais baixo que o gasóleo. Uma vez que no motor diesel o combustível só é injetado na câmara de combustão, após a compressão este fenómeno não ocorre.
- No motor a gasolina é comprimida uma mistura de ar (gás) e combustível (líquido), ao contrário do motor diesel onde é apenas comprimido o ar (gás),

levando a que o mesmo seja mais eficiente, uma vez que é mais fácil comprimir um gás do que um líquido ou uma mistura de gás e líquido.

- Devido à elevada taxa de compressão¹ (tipicamente 15:1 a 23:1) e à queima inerente simples, os motores diesel apresentam maior eficiência térmica comparativamente a outros motores de combustão interna (nomeadamente os de ciclo *Otto*, a gasolina), uma vez que, através da elevada taxa de compressão, conseguem atingir as mesmas temperaturas de combustão usando menos combustível. Este aumento da taxa de compressão resulta também num ciclo de expansão mais longo, fazendo com que a libertação gases de escape para a atmosfera seja feita a temperaturas mais baixas, evitando assim um desperdício energético.

Na Figura 2.1 estão representados, em diagrama P-V, o ciclo *Otto* a gasolina (à esquerda) e o ciclo diesel (à direita).

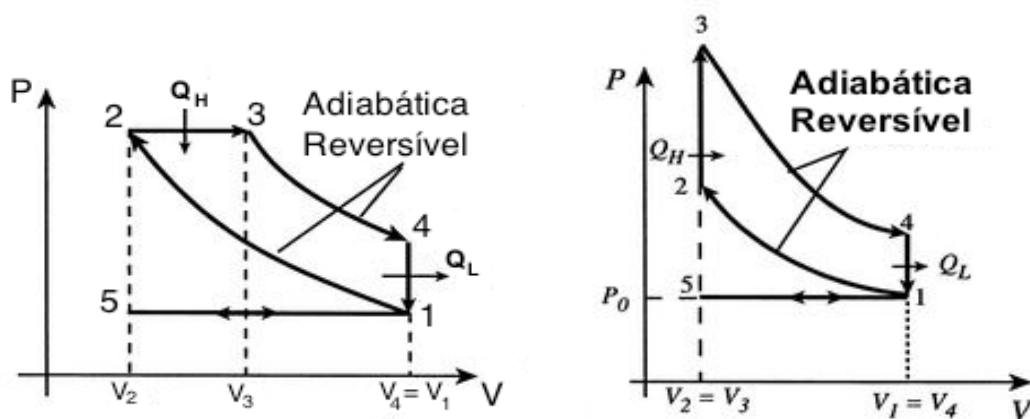


Figura 2.1 – Ciclo diesel (à esquerda) e *Otto* a gasolina (à direita) representados em diagrama P-V, adaptado de [40][41]

As principais etapas do ciclo diesel, representado acima, são:

- 1-2 – Compressão adiabática (isentrópica);
- 2-3 – Combustível queimado durante o aumento de volume a pressão constante (isobárica) no caso do diesel e durante o aumento de pressão;
- 3-4 – Expansão adiabática (isentrópica);
- 4-1 – Perda de calor a volume constante (isocórica);
- 4-5-1 – Lavagem do motor, substituição dos gases queimados com ar fresco a pressão constante, sem perda de carga (isobárica).

¹ Entende-se por taxa de compressão um valor adimensional que representa a proporção entre o volume de ar aspirado e o da câmara de combustão.

Na Figura 2.2 estão representados, em diagrama T-S, o ciclo *Otto* a gasolina (à esquerda) e o ciclo diesel (à direita).

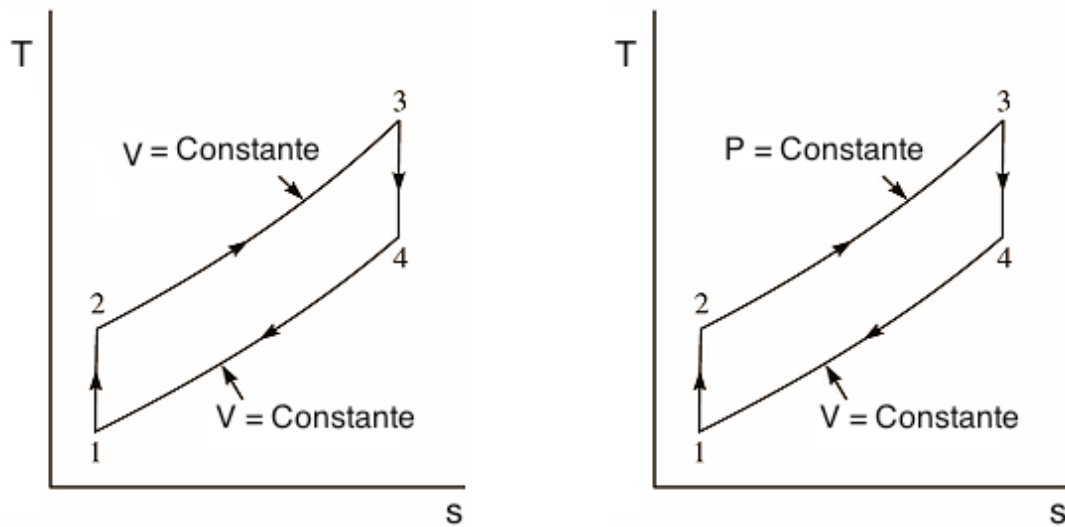


Figura 2.2 –Ciclo diesel (à esquerda) e Ciclo *Otto* a gasolina (à direita) representados em diagrama T-S, adaptado de [42] e [43].

A Figura 2.3 ilustra os principais componentes de um motor diesel e a gasolina. A principal diferença entre ambos consiste na existência de injetores no motor diesel (à esquerda), enquanto no motor gasolina (à direita) existem velas de ignição.

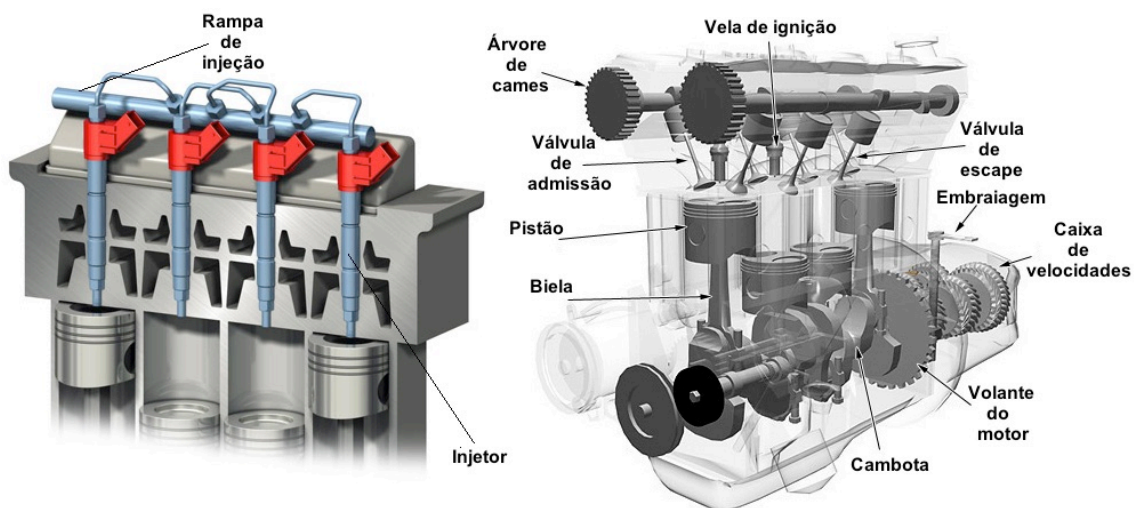


Figura 2.3 – Principais componentes do motor a diesel (à esquerda) e a gasolina (à direita) [44].

Na equação (1) pode ser visto a fórmula que calcula o rendimento de um ciclo *Otto* (gasolina), sendo que γ é a constante adiabática e TC a taxa de compressão.

$$\eta = 1 - \frac{1}{TC^{\gamma-1}} \quad (1)$$

Dado a crescente procura por motores mais eficientes e menos poluentes, o motor diesel sofreu algumas alterações ao longo dos anos. Alteração do sistema de injeção de combustível, introdução de catalisador, filtro de partículas e recirculação de gases de escape foram algumas das alterações mais relevantes ao longo dos anos de existência deste tipo de motores.

O sistema de injeção é o sistema responsável por injetar combustível na câmara de combustão a elevada pressão. Nos primeiros sistemas de injeção existia uma bomba de alta pressão (bomba injetora) que recebia o combustível vindo do depósito de combustível (bombeado através de uma bomba de combustível), a bomba de alta pressão era responsável por multiplicar a pressão do combustível e enviá-lo para os injetores para ser injetado na câmara de combustão. Uma vez que através das altas pressões de injeção é possível uma pulverização de gotículas mais pequenas e criar maior turbulência na câmara de combustão resultando assim numa melhor mistura de ar-combustível e numa queima mais completa do combustível surgiu então a necessidade de aumentar estas pressões de injeção. Como o sistema de bomba injetora não o estava a garantir, surgiu o sistema a que se dá o nome de injetor bomba. Neste sistema não existe a bomba de alta pressão (bomba injetora), mas sim uma bomba individual acoplada a cada injetor responsável por o alimentar de combustível. Este sistema (injetor bomba) foi uma boa reação dos fabricantes aos requisitos necessários, contudo o ruído que o sistema provoca na fase inicial de aceleração e a maneira brusca como funciona no arranque ditaram a que os fabricantes procurassem uma nova alternativa e foi assim que surgiu o sistema de injeção *Common Rail*. Neste último os injetores não estão ligados diretamente à bomba injetora, mas sim a uma rampa comum (*rail*). Neste sistema o combustível é continuamente bombeado para esta rampa, aumentando assim a pressão, recebendo então cada cilindro o combustível através desta rampa. Este fornecimento de combustível ao cilindro é realizado por injetores a elevadas pressões independentemente da rotação do motor sendo o comando dos injetores controlado por válvulas magnéticas presentes em cada um destes. Este sistema é capaz de fornecer pressões elevadas, como o sistema injetor bomba, mas com mais suavidade, permitindo um maior conforto e melhor condução ao utilizador do veículo.

A Figura 2.5, representa o esquema de um sistema de injeção *Common Rail*.

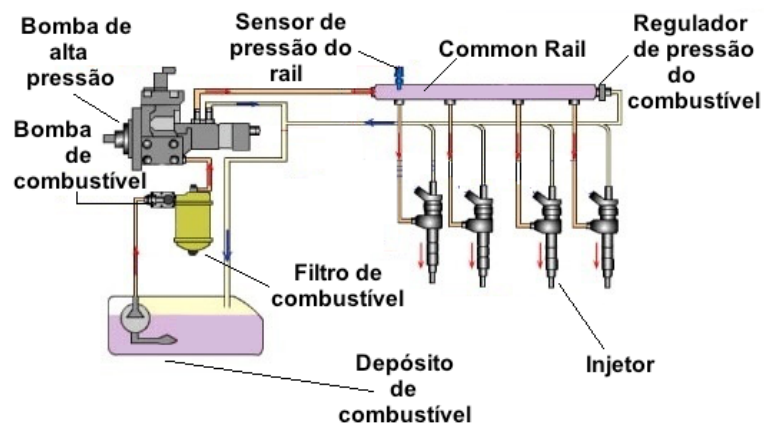


Figura 2.5 – Sistema de injeção *Common Rail*, adaptado de [45].

Outra alteração no motor diesel, devido às exigentes normas antipoluição, foi a introdução da recirculação dos gases de escape (*EGR – Exhaust Gas Recirculation*). O sistema *EGR* (Figura 2.4) permite que parte dos gases de escape mais pobres em oxigénio e resultantes da queima de combustível sejam novamente introduzidos na admissão, assim poderemos ter um teor mais baixo de oxigénio na admissão resultando numa libertação de um menor teor de NO_x . Um dos inconvenientes desta tecnologia é que ao introduzir gases de escape na admissão, estamos a “sujar” a conduta de admissão, uma vez que estes gases se encontram poluídos pelo combustível queimado, podendo limitar a eficiência do motor a longo prazo. Para controlar a quantidade de gás de escape que é novamente introduzido na admissão existe uma válvula, a que se dá o nome de válvula *EGR*. A abertura e fecho desta válvula está diretamente ligada à solicitação do acelerador, ou seja, encontra-se mais aberta ao ralenti e fecha-se quando o acelerador se encontra no máximo, cabendo à centralina do motor fazer a gestão desta abertura/fecho. Faz parte deste sistema também um refrigerador (*cooler*) cujo objetivo é arrefecer os gases de escape antes de serem introduzidos na admissão.

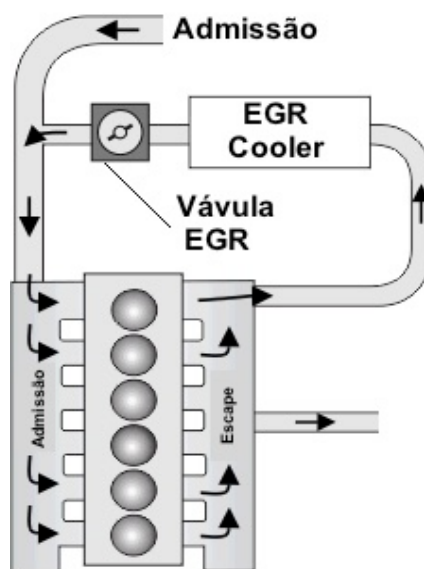


Figura 2.4 – Sistema *EGR- Exhaust Gas Recirculation*, adaptado de [46].

Para reduzir as emissões ao longo dos últimos anos surgiram novas tecnologias como a utilização de catalisador, filtros de partículas e a utilização de ureia no tratamento dos gases de escape.

O catalisador (Figura 2.7) encontra-se no sistema de escape do motor, é um componente semelhante a uma panela de escape que no seu interior tem algo semelhante a uma colmeia. Esta “colmeia” é feita de platina, ródio e paládio e quando os gases de escape passam através desta dá-se uma reação que transforma os gases nocivos da combustão como hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogénio em gases menos nocivos para o meio ambiente como dióxido de carbono e vapor de água (Figura 2.6). Em certos veículos o catalisador encontra-se por baixo do veículo, mas mais recentemente tem havido a tendência de este ser colocado mais perto do coletor de escape, isto deve-se ao facto de que quanto mais quente o catalisador se encontrar melhor e mais rápida será a reação de conversão destes gases.

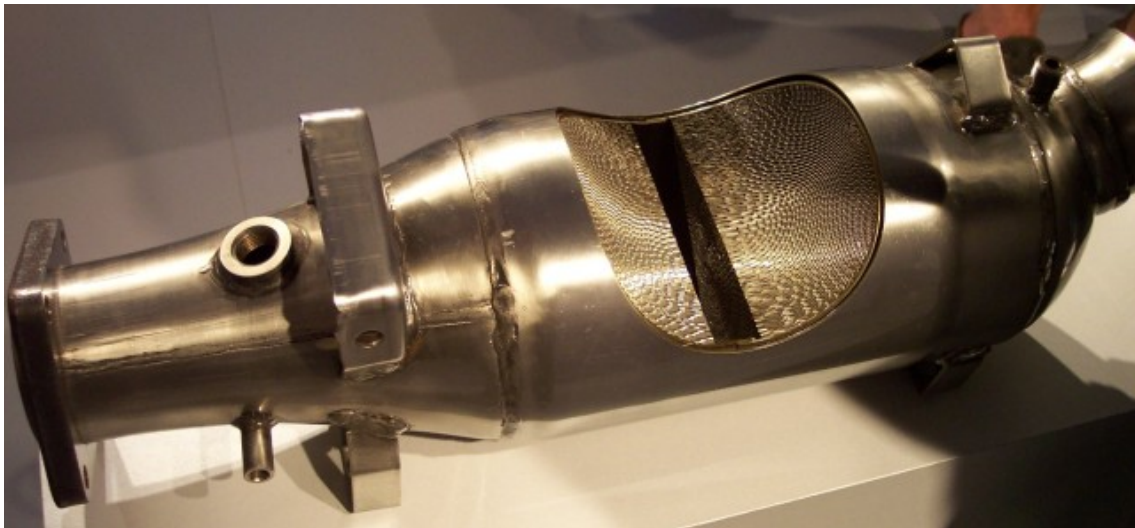


Figura 2.7 – Representação do interior de um catalisador [48].

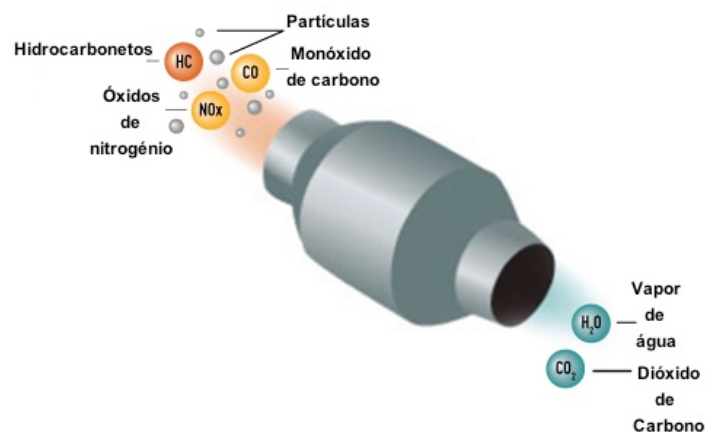


Figura 2.6 – Catalisador de um motor diesel, adaptado de [47].

Posteriormente à introdução dos catalisadores e com o objetivo de reduzir as emissões de partículas resultantes da queima do gásóleo (combustível não queimado), cujo catalisador não consegue reter, introduziu-se o que se chama de filtro de partículas (Figura 2.8). No filtro de partículas, ao contrário do catalisador em que os gases passam pelos canais abertos “colmeia”, os gases são forçados a passar através de paredes cerâmicas e porosas ficando assim as partículas de fuligem retidas no filtro.

Como qualquer filtro, este componente necessita de ser limpo para continuar a desempenhar a sua função corretamente. A esta limpeza dá-se o nome de regeneração do filtro de partículas, esta regeneração consiste em queimar as partículas que ficam retida no filtro. Atualmente existem dois tipos de regeneração, a regeneração passiva e a regeneração ativa. A regeneração passiva acontece por norma em condições em que o motor esteja a ser fortemente solicitado, pois neste regime os gases de escape encontram-se a temperaturas mais elevadas permitindo assim a queima das partículas retidas no filtro. Para ajudar no aumento de temperatura, o filtro de partículas encontra-se colocado perto do motor para estar sujeito a temperaturas mais altas e os canais através do qual passam os gases são revestidos por platina por forma a aumentar a temperatura quando os gases passam através das paredes porosas do filtro. Como nem todos os veículos estão sujeitos a regimes em que o motor esteja a ser fortemente solicitado, os fabricantes criaram o que se chama de regeneração ativa. Na regeneração ativa, a quantidade de combustível e o *timing* da injeção podem ser variados, com o objetivo de haver gásóleo não queimado na linha de escape com o objetivo de aumentar a temperatura do filtro de partículas e assim permitir a sua regeneração. Este processo ocorre automaticamente sem qualquer ação do condutor e sem que este note a sua ocorrência. Quando os filtros de partículas se encontram mais longe do motor, normalmente recorrem a aditivos para que a combustão das partículas retidas no filtro possa ocorrer a temperatura mais elevadas para que a sua regeneração possa ser feita.

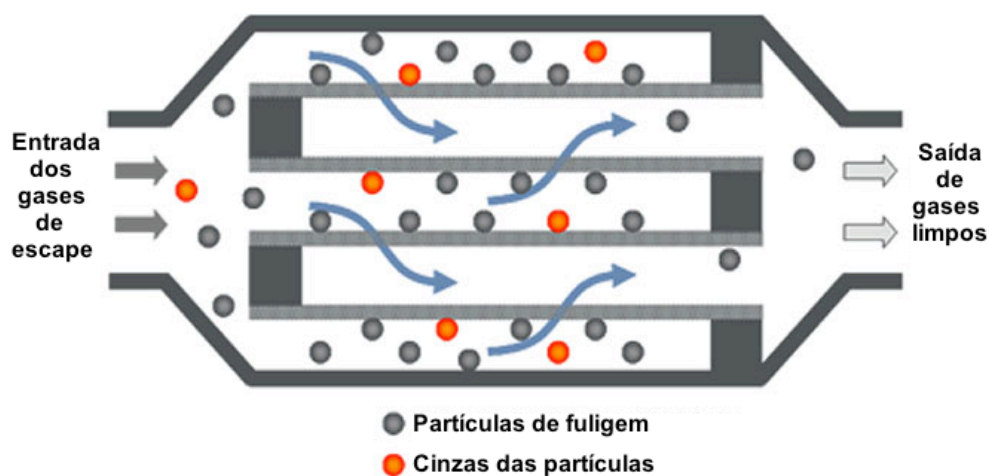


Figura 2.8 – Esquema de funcionamento do interior de um filtro de partículas [49].

Uma tecnologia mais recente para a redução das emissões geradas pelo motor diesel é a injeção de ureia para o tratamento dos gases de escape. Esta tecnologia consiste em pulverizar uma mistura de ureia e água (obtida sinteticamente) nos gases de escape após saírem do catalisador e antes de entrarem no filtro de partículas. A pulverização da mistura nos gases de escape permite converter os conhecidos NO_x , típicos de ignição por compressão (diesel) devido às elevadas pressões e temperaturas a que operam, em moléculas de azoto e vapor de água.

Na Tabela 2.1 podem ser vistas as normas europeias de emissões para veículas diesel.

Tabela 2.1 – Normas europeias de emissões para veículos diesel, adaptado de [5].

Norma	Data	CO	HC+NO _x	NO _x	Partículas
		(g/km)			
Euro 1	07/1992	2,72	0,97	-	0,14
Euro 2	01/1996	1,0	0,7	-	0,08
Euro 3	01/2000	0,64	0,56	0,5	0,05
Euro 4	01/2005	0,5	0,3	0,25	0,025
Euro 5	09/2009	0,5	0,23	0,18	0,005
Euro 6	09/2014	0,5	0,17	0,08	0,005

2.2. Lubrificantes em Motores Diesel

2.2.1. O Óleo de Motor

Os motores diesel não só exigem uma elevada capacidade de carga a cada componente, como também exigem bastante do lubrificante utilizado, tornando-o um agente de operação tecnicamente complexo. Como as condições de funcionamento de motores diesel a atuar em automóveis de passageiros diferem das condições a que estão submetidos motores de maiores dimensões, a escolha de um lubrificante é de elevada responsabilidade, cabendo ao fabricante decidir qual o lubrificante mais adequado a cada equipamento.

Os óleos de motor consistem numa mistura de óleo base com alguns aditivos e agentes. Existem óleos minerais puros, mistura de óleos minerais com sintéticos ou óleos puramente sintéticos. Estes últimos (óleos sintéticos) possuem maior estabilidade oxidativa, menores perdas por evaporação e melhor resistência à mudança de viscosidade-temperatura, face aos óleos minerais. Contudo, são menos solúveis e a sua compatibilidade com materiais de vedantes torna-se mais problemática [6].

Como num motor é o lubrificante que faz a proteção contra o desgaste de componentes que estão sujeitos a cargas mecânicas e fricção, este é considerado um elemento crucial para a função e a vida útil do motor. Mais recentemente, é dada mais importância à otimização tribológica para a melhoria de eficiência dos motores, tornando assim o lubrificante num parâmetro de monitorização importante.

As novas tecnologias, que reduzem a emissão de gases e poluentes climáticos, criam exigências adicionais muito específicas, obrigando ao desenvolvimento de óleos que economizem combustível e sejam compatíveis com dispositivos para a redução de poluição como o catalisador.

Caracterizados pelas suas propriedades químicas e físicas, o óleo de motor tem requisitos que são determinados pelas suas principais funções, como por exemplo [7]:

- Separação de superfícies deslizantes (lubrificação)
- Transmissão de forças
- Neutralização de produtos indesejáveis
- Proteção contra o desgaste
- Selagem
- Arrefecimento
- Proteção contra a corrosão

Além destas funções, são exigidos outros requisitos ao óleo de motor, tais como:

- Neutralidade em relação aos materiais de vedantes
- Baixa tendência à formação de espuma
- Longa vida útil e grandes intervalos de mudança de óleo
- Baixo consumo de óleo
- Baixo consumo de combustível
- Baixa carga no sistema de controlo de emissões

2.2.2. Evolução da Refinação de Óleos Base

O aparecimento do primeiro lubrificante remonta há 3000 anos, quando se recorria à gordura animal para aplicar nos eixos das carroças. Sabia-se que a aplicação deste tipo de substância facilitava o funcionamento dos eixos das carroças. Até meados do século XIX, a gordura animal continuou a ser a substância mais utilizada para este tipo de funções.

Só perto de 1912 surgiram os primeiros óleos à base de petróleo. Inicialmente, não foram bem aceites, uma vez que não aparentavam ser tão eficazes como os de origem animal, pois nessa altura a indústria petrolífera ainda estava em fase de desenvolvimento.

Apesar disso, com a produção em série de automóveis, a indústria petrolífera rapidamente se apercebeu de que era possível fazerem-se óleos lubrificantes à base de petróleo,

mais eficazes do que os de origem animal. Efetivamente, os óleos foram sofrendo várias melhorias na refinação e viscosidade variável.

Em 1923, a SAE – *Society of Automotive Engineers* (Sociedade dos Engenheiros Automóveis) – classificou os óleos em 3 diferentes categorias, de acordo com a sua viscosidade: leve, médio ou pesado.

Nesta altura os óleos de motor não continham quaisquer aditivos e tinham de ser substituídos, em média, a cada 1500 km.

Por volta de 1920, os fabricantes de lubrificantes começaram a processar os seus óleos base, com o objetivo de melhorar a sua performance. Nessa altura, existiam três formas de processamentos distintas [8]:

- Tratamento de argila
- Tratamento ácido
- Tratamento de dióxido de enxofre (SO₂)

No tratamento de argila, esta era usada para absorver e remover alguns dos piores compostos do óleo à base de petróleo. Tais como enxofre e azoto.

No tratamento ácido, o ácido sulfúrico concentrado era usado para reagir com os compostos não desejáveis no óleo base, convertendo-os em lodo que posteriormente podia ser removido. Apesar de este processo retirar os compostos indesejáveis no óleo, era bastante dispendioso e originava lamas tóxicas e poluentes, acabando por cair em desuso por questões ambientais.

Relativamente ao tratamento de dióxido de enxofre, este consistia num processo primitivo que permitia remover os compostos indesejados no óleo através de um solvente reciclável. Contudo, o solvente era altamente tóxico, levando a que este tratamento também caísse em desuso ainda que tenha sido bastante importante para a evolução da extração por solventes nos óleos.

Em 1930, o processamento de solventes emergiu como sendo uma tecnologia bastante viável para melhorar o desempenho de um óleo base, recorrendo a substâncias razoavelmente seguras e recicláveis.

Nos dias de hoje a maioria dos óleos base ainda utilizam este processo, sendo que cerca de dois terços dos óleos base na América do Norte são atualmente processados usando solventes. Estes óleos base refinados com solvente são, por norma, designados como óleos base de Grupo I.

Os óleos base de Grupo I são óleos com menos de 90% de ácidos gordos saturados e mais de 300 ppm² de enxofre. Na Tabela 2.2 podem ser consultados os grupos de óleos base classificados segundo a API (*American Petroleum Institute*).

² ppm – partes por milhão

Tabela 2.2 – Grupos de óleos base, segundo a API (*American Petroleum Institute*), adaptado de [3].

Grupo	Enxofre, % de peso	Ácidos saturados	Índice de Viscosidade
I	>0.03	e/ou <90	80-119
II	<0.03	e >90	80-119
III	<0.03	e >90	≥120
IV	Todas as polialfaolefinas (PAOs)		
V	Todos os não incluídos nos restantes grupos (óleos pálidos e sintéticos não PAOs)		

Nas décadas seguintes, o processo de refinação com solventes pouco alterou, sendo que as melhorias da qualidade do óleo advieram principalmente do aparecimento dos aditivos. Estes começaram a ser frequentemente utilizados em 1947, quando a API começou a caracterizar os óleos pela sua exigência durante o funcionamento: normal, *premium* ou serviço pesado. Os aditivos eram utilizados para melhorar a longevidade dos óleos, principalmente nos *premium* e nos de serviço pesado.

Em 1950 foram introduzidos no mercado os primeiros óleos multigraduados, formulados para melhorarem o desempenho a quente e a frio do lubrificante. A qualidade do lubrificante melhorou significativamente aquando da melhoria da química aditiva, sendo que foi através destes aditivos que foi possível alterar o índice de viscosidade do óleo.

Ainda na década de 50, o *Hydrotreating* (hidrotratamento) surgiu como um processo adicional de “limpeza” do óleo realizado depois de uma etapa de refinação convencional por solvente. Neste processo, o hidrogénio era adicionado ao óleo base a elevadas temperaturas na presença de um catalisador, com o objetivo de estabilizar os componentes mais reativos do óleo base, melhorar a cor e aumentar a sua vida útil. Este processo removeu algumas das moléculas que continham azoto e enxofre, mas demonstrou-se insuficiente para remover uma quantidade significativa de compostos aromáticos. Contudo, foi uma melhoria na técnica que se viria a tornar bastante importante.

O *Hydrocracking* (hidrocraqueamento) é uma forma mais rigorosa de hidroprocessamento que resulta da adição de hidrogénio a temperaturas e pressões ainda mais elevadas do que o *Hydrotreating* simples. Através deste processo é possível remover-se a maior parte do enxofre, nitrogénio e aromáticos. Através deste processo, é possível obter óleos base “limpos” [7].

O desparafinamento catalítico foi uma boa alternativa, face aos anteriores processos com recurso a solventes, nomeadamente no fabrico de óleos cerosos com elevados índices de viscosidade. Este processo permitiu remover parafinas e cadeias cerosas, o que ajudou na

diminuição do ponto de fluxo³ do óleo base e favoreceu a sua fluidez a baixas temperaturas e permitiu a remoção de compostos indesejáveis, tais como os aromáticos.

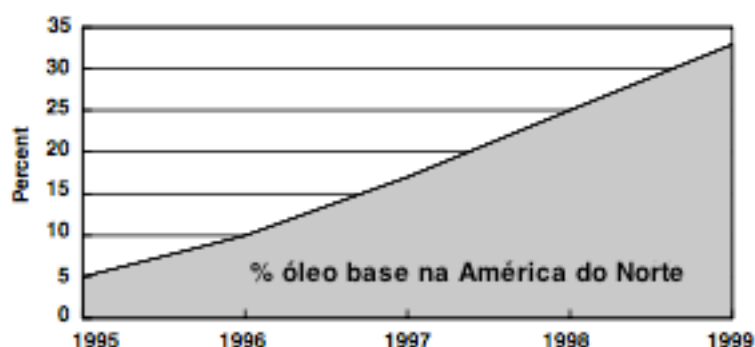


Figura 2.9 – Tendência do *Hydrocracking* na América do Norte, adaptado de [7].

Em 1994, a *Chevron* foi pioneira na combinação das três etapas de hidrocessamento catalítico: hidrocraqueamento, hidroisomerização e hidrotratamento. Através desta combinação, tornou-se possível transformar as moléculas pouco lubrificantes em moléculas de óleo base de boa qualidade, levando ao controlo independente dos pontos de fluidez, índices de viscosidade e estabilidade à oxidação. Isto diferia bastante das abordagens anteriores, porque não se baseava apenas na remoção das moléculas indesejáveis.

Os *PAO* (*Polyalphaolefins*) surgiram em meados dos anos 70 quando alguns lubrificantes específicos foram formulados [9]. Nos últimos anos, o mercado dos *PAO* aumentou significativamente, em primeiro lugar na Europa e, mais tarde, nos Estados Unidos, apesar de inicialmente não ter sido um lubrificante bem aceita devido aos elevados custos a que estava associado. Uma das principais razões deste aumento do mercado na Europa está relacionada com as especificações cada vez mais restritivas para os lubrificantes, criando um nicho de mercado para os hidrocarbonetos sintéticos e semissintéticos. (óleos de base polimerizada como os *PAO's*).

Face aos restantes tipos de lubrificantes, os *PAOs* têm características de desempenho de lubrificação superiores, tais como o índice de viscosidade, ponto de fluidez, volatilidade e estabilidade à oxidação, que não conseguem ser atingidos com recurso a óleos minerais convencionais.

³ Ponto de fluxo – o ponto de fluxo de um lubrificante é a temperatura mais baixa, expressa em múltiplos de 3°C à qual é observada ausência de fluidez.

2.2.3. Propriedades Físicas do Óleo de Motor

Segundo a APETRO (Associação Portuguesa de Empresas Petrolíferas) um óleo de motor pode ser caracterizado pelas seguintes propriedades físicas [10]:

- Cor
- Densidade
- Viscosidade
- Índice de viscosidade (IV)
- Ponto de fluxo
- Ponto de inflamação
- Ponto de congelação
- Ponto de vaporização
- TAN (*Total Acid Number*) – número total de acidez
- TBN (*Total Base Number*) – número total de basicidade
- Rigidez dielétrica
- Volatilidade
- Resistência à oxidação

A viscosidade é das propriedades física mais relevantes de um lubrificante, uma vez que se relacionam com a capacidade da película de óleo em manter separadas duas superfícies metálicas em movimento. De certa maneira, pode-se definir a viscosidade como sendo uma medida de resistência do fluido ao seu escoamento. Quanto mais elevada for a viscosidade, maior será a resistência oferecida pelo fluido. De acordo com o Sistema Internacional (SI), a unidade de viscosidade cinemática é m^2/s .

A viscosidade do lubrificante tende a variar com a temperatura e pressão a que é sujeito, tornando-se menos viscosos a elevadas temperaturas e mais quando é sujeito a temperaturas mais baixas. Assim, surgiu a necessidade de definir um parâmetro para quantificar esta variação de viscosidade com a temperatura. A este parâmetro foi dado o nome de índice de viscosidade (IV). Quanto mais elevado for o seu IV, menor será a variação da viscosidade com a temperatura e consequentemente obter-se-á um lubrificante com uma viscosidade mais estável.

Por esta razão, é importante escolher um lubrificante com um IV adequado, de modo a que, a baixas temperaturas (arranque a frio do motor), a viscosidade não seja demasiado elevada e leve ao aumento da resistência ao arranque, e que, quando sujeito a uma temperatura elevada (motor quente), não perca a sua capacidade de formação de filme lubrificante entre peças em contacto.

O ponto de inflamação pode ser definido como a temperatura a partir do qual um óleo se inflama, sob ação de uma chama. Este parâmetro pode tornar-se bastante relevante, principalmente quando se utilizam óleos perto de fontes de calor.

Por vezes, os lubrificantes têm de funcionar em ambientes frios e é necessário que se mantenham suficientemente fluidos, garantindo que, após o arranque do motor, seja possível lubrificar todos os pontos necessários. Deste modo, existe o ponto de fluxão que é a temperatura, expressa em múltiplos de 3°C, a partir da qual é observada a ausência de fluidez de um lubrificante quando é arrefecido sob condições de ensaio. Normalmente, não é recomendável o uso de um lubrificante quando a temperatura ambiente for inferior a 10°C em relação ao ponto de fluxão.

O número total de acidez (TAN) é a quantidade de Hidróxido de Potássio (expressa em miligramas) necessária para neutralizar um grama de óleo (mg KOH/g óleo). O aumento do nível acidez do lubrificante pode dever-se, por exemplo, à presença de substâncias como ácidos orgânicos, que se encontram presentes em óleos devido aos compostos de enxofre presentes nos combustíveis. O TAN permite comparar os resultados de vários ensaios ao mesmo óleo e avaliar as alterações que ocorrem com a sua utilização.

O número total de basicidade (TBN) de um óleo é a quantidade em miligramas de ácido clorídrico ou perclórico, expressa em quantidade equivalente de hidróxido de potássio (KOH), necessária para neutralizar as substâncias presentes numa grama de óleo que reagem com esses ácidos. Este tipo de teste é feito, por norma, em óleos que contêm aditivos alcalinos. À semelhança do TAN, os valores do TBN permitem comparar os resultados de diferentes testes para o mesmo óleo e avaliar a alteração do mesmo ao longo do tempo. A basicidade de um óleo de motor é relevante, principalmente em motores diesel de grande porte, uma vez que são lubrificados com óleos pesados altamente sulfurosos (óleos com elevada acidez).

A rigidez dielétrica de um material é o valor máximo do campo elétrico em kV/cm que pode ser aplicado no material para que este deixe de funcionar como isolante e passe a ser um condutor.

A volatilidade é uma grandeza que representa a facilidade de determinada substância passar do estado líquido ao estado gasoso. Esta facilidade é relativa, ou seja, a volatilidade de uma substância é sempre medida em relação a outra.

2.2.4. Aditivos nos Lubrificantes

Nos dias de hoje, os óleos de motor contêm inevitavelmente aditivos, de forma a puderem cumprir os seus requisitos, sendo chamados de óleos totalmente formulados.

A Tabela 2.3, sintetiza e caracteriza alguns compostos químicos mais utilizados como aditivos em óleos de motor de alto desempenho.

Tabela 2.3 – Óleos de motor: tipos de aditivos, compostos químicos e sua respetiva função, adaptado de [3].

Tipo	Exemplo	Função
Detergentes básicos	Sulfonato de magnésio ou cálcio, fenolatos ou salicilatos	<ul style="list-style-type: none">• Neutralização dos ácidos• Inibição da formação de verniz
Dispersantes sem cinzas	Succinimidas de poliisobuteno	<ul style="list-style-type: none">• Dispersão de fuligem e produtos de oxidação• Inibição do depósito de impurezas e verniz
Antioxidantes	Ditiofosfatos de zinco, fenóis inibidores, olefinas sulfuradas com fósforo, salicilatos metálicos, aminas	<ul style="list-style-type: none">• Inibição do engrossamento e oxidação do óleo
Aditivos de alta pressão	Ditiofosfatos de zinco, fosfatos orgânicos, compostos orgânicos de enxofre	<ul style="list-style-type: none">• Inibição de desgaste
Aditivos antiferrugem/corrosão	Sulfonatos de cálcio ou de sódio, fosfatos de amina, ditiofosfatos de zinco	<ul style="list-style-type: none">• Inibição de corrosão
Melhoradores do índice de viscosidade	Polimetacrilatos, copolímeros de etileno-propileno, copolímeros de estireno-butadieno	<ul style="list-style-type: none">• Redução da perda de viscosidade com o aumento da temperatura
Agentes anti espuma	Compostos de silício, acrilatos	<ul style="list-style-type: none">• Redução da formação de espuma na circulação intensa
Modificadores de fricção	Ácidos gordos, derivados de ácidos gordos, aminas orgânicas, fosfatos de amina	<ul style="list-style-type: none">• Redução da perda das forças de atrito

6Detergentes e dispersantes unem as suas extremidades polares a produtos de combustão e oxidação insolúveis em óleo, mantendo-os em suspensão através da ajuda das cadeias de hidrocarbonetos oleofílicos⁴. Deste modo, impedem que estes produtos se depositem em superfícies metálicas e engrossem o óleo, diminuindo a formação de lodo no motor.

Os detergentes básicos contêm íões metálicos (cálcio e magnésio) que funcionam como proteção contra à corrosão permitindo neutralizar os produtos de combustão ácidos que atingem o óleo. Representado pelo TBN (*Total Base Number*), a basicidade de um óleo de motor é relevante, principalmente em motores diesel de grande porte, uma vez que são lubrificados com óleos pesados altamente sulfurosos (óleos com elevada acidez).

Os antioxidantes têm como função a inibição da degradação do lubrificante por ação do oxigénio [11].

Os melhoradores de viscosidade são polímeros, que se aglomeram em pequenas esferas a baixas temperaturas e dispersam-se a temperaturas mais elevadas, resultando num espessamento. Estes polímeros permitem que os óleos consigam manter os limites de viscosidade ao longo da sua vida útil, podendo resultar numa redução de consumo de combustível.

Melhoradores de ponto de congelamento são aditivos que retardam a cristalização das parafinas existentes em óleos de base mineral, melhorando o desempenho do lubrificante a baixas temperaturas.

Por fim, os redutores de atrito, tal como o próprio nome indica, têm como função reduzir o atrito do corpo sólido nas regiões de fricção através da formação de uma camada de adsorção que separa as duas superfícies, sendo também um dos fatores potenciadores da redução do consumo de combustível.

⁴ Oleofílicos – que têm afinidade química com óleos

2.3. Combustível em Motores Diesel

2.3.1. Produção

No final do século XIX, quando Rudolf Diesel desenvolveu o primeiro motor de autoignição percebeu-se que, devido à sua resistência à autoignição, a gasolina era um combustível inadequado. Após ensaios aos vários combustíveis, verificou-se que os destilados médios, que na altura eram utilizados em candeeiros a óleo e como aditivos ao gás natural, eram os combustíveis mais adequados.

A melhor eficiência e os custos iniciais de produção mais baixos levaram ao sucesso comercial do motor diesel, apesar dos muitos problemas técnicos que apresentou no início.

Este tipo de motores podia utilizar variados tipos de combustível, desde que fossem suficientemente inflamáveis. Com as crescentes exigências de segurança operacional, emissões de escape e ruído, começaram a ser requeridos alguns fatores adicionais de qualidade ao gasóleo, como por exemplo:

- Limpeza
- Estabilidade à oxidação
- Fluidez a baixas temperaturas
- Fiabilidade na lubrificação
- Baixo teor de enxofre

Atualmente, o gasóleo é especificado de uma forma tão rigorosa e precisa como a gasolina. Requisitos como a qualidade da ignição, capacidade de funcionamento a baixas temperaturas, nível de lubrificação e baixo teor de enxofre levaram a que fosse necessário o uso de aditivos no gasóleo.

Uma das questões levantadas com o tema dos combustíveis é a sua disponibilidade. O gasóleo utilizado obtém-se quase exclusivamente do petróleo bruto que se sabe ser um recurso não renovável.

Com o aumento do custo do petróleo bruto nos mercados internacionais, o capital empregue nas explorações petrolíferas cresceu. Contudo, também levou ao aumento da procura de alternativas de matéria-prima e novos processos de fabricação, dada a forma desigual como as reservas petrolíferas estão distribuídas pelo mundo.

A relação entre a extração anual e as reservas exploráveis é um parâmetro que mede a disponibilidade e, atualmente, supõe-se que as reservas durem aproximadamente 40 anos. Estima-se que, em 2008, foram consumidos aproximadamente 200 milhões de toneladas de gasóleo, sendo que a maioria da matéria-prima é proveniente do Médio Oriente [12].

Na produção clássica de gasóleo (destilação), tal como se pode confirmar pela Figura 2.10, o rendimento varia conforme o óleo bruto utilizado (leve e baixa viscosidade ou pesado e alta viscosidade)

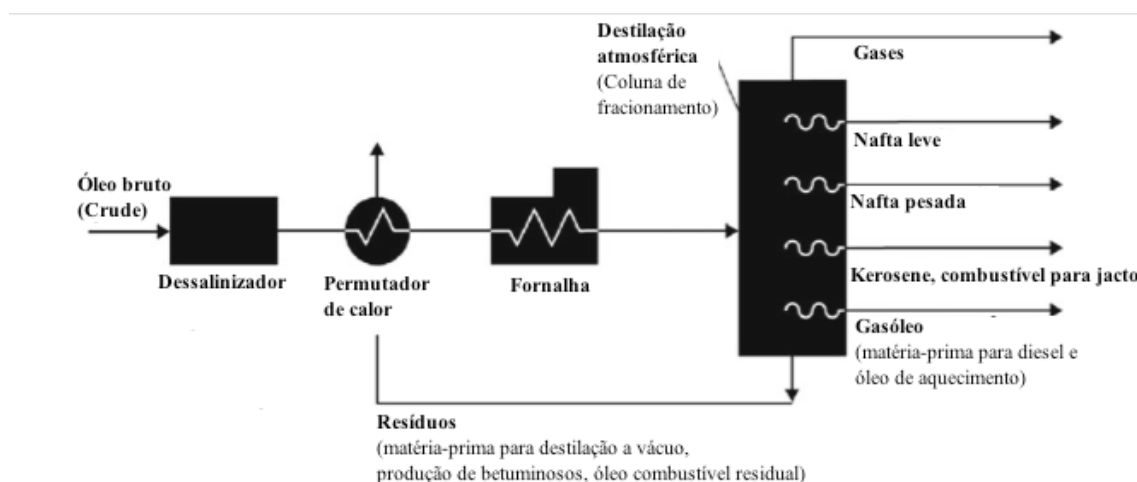


Figura 2.10 – Esquema simplificados de uma instalação de destilação de petróleo, adaptado de [38].

O gasóleo é produzido a partir de destilados médios, não só através da simples destilação atmosférica e a vácuo, como também por processos como o craqueamento térmico ou catalítico e hidrocraqueamento. Estes últimos processos não só aumentam o rendimento do petróleo bruto, como também a qualidade do combustível (gasóleo) produzido.

Cada processo de craqueamento rompe as frações do petróleo bruto com elevados pontos de ebulição, convertendo-as em hidrocarbonetos com pontos de ebulição mais baixos. No craqueamento térmico são utilizadas somente altas temperaturas e pressões. No caso de se tratar de um craqueamento catalítico, é adicionado um catalisador ao processo. Através destes processos, a composição química do produto processado pode ser mais facilmente controlada, havendo uma menor presença de hidrocarbonetos instáveis.

O hidrocraqueamento permite uma maior flexibilidade em termos da estrutura de rendimento (gasolina ou destilados médios). Neste tipo de processo, é adicionado hidrogénio no catalisador reduzindo significativamente os compostos que não são adequados para o combustível como os aromáticos.

Outro processo muito importante é a dessulfuração. Dependendo da proveniência do óleo bruto, este pode apresentar variadas concentrações de enxofre, tal como se pode confirmar pela Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Percentagem de enxofre por peso do gasóleo em função da sua origem, adaptado de [3].

Proveniência	Designação	Percentagem de enxofre, por peso
Mar do Norte	Brent	0.4
	Irão (pesado)	1.7
Médio Oriente	Arábia (leve)	1.9
	Arábia (pesado)	2.9
África	Líbia (leve)	0.4
	Nigéria	0.1 - 0.3
América do Sul	Venezuela	2.9
Rússia		1.5
Norte da Alemanha		0.6 – 2.2

Para obter o reduzido teor de enxofre atualmente requerido para o gasóleo (a União Europeia limita que o teor máximo de enxofre presente no gasóleo em 2016 seja no máximo de 0,1% em massa [13], o que constitui metade dos 0,2% em massa admitidos em 2000 [14]) é necessária uma dessulfuração extremamente eficaz. A regulamentação quanto ao limite de enxofre deve-se ao facto de este ser um dos causadores da emissão de partículas e de precursores de ozono (responsáveis pela degradação da camada de ozono).

Dependendo do óleo bruto utilizado e dos sistemas de refinaria disponíveis, o gasóleo é produzido a partir de vários componentes, resultando num produto de alta qualidade que é estável para motores e cumpre com as exigências de qualidade para verão e inverno. Os produtos mais comuns da destilação atmosférica e a vácuo são:

- Kerosene
- Gasóleo leve
- Gasóleo pesado
- Gasóleo a vácuo (utilizado como matéria prima para processos de craqueamento a jusante)

Apesar dos produtos resultantes da destilação apresentarem diferentes composições dependendo da origem do óleo bruto utilizado, os produtos do craqueamento dependem apenas do processo utilizado. Na Tabela 2.5 podem ser observados os produtos do combustível gasóleo que são obtidos através de diferentes processos.

Tabela 2.5 – Composição do gasóleo em função do processo de refinação a partir do qual foi obtido, adaptado de [3].

Componentes do gasóleo	Parafinas	Olefinas	Aromáticos
Gasóleo de destilação direta	Médio a alto	Baixo a muito baixo	Médio a alto
Gasóleo craqueado termicamente com hidrogenação	Alto	Muito baixo	Baixo
Gasóleo craqueado cataliticamente	Baixo	Ausente	Alto
Gasóleo hidrocraqueado	Muito alto	Ausente	Muito baixo
Gasóleo sintético (SMDS)	Muito alto	Ausente	Muito baixo ou ausente

É comum misturar aditivos no combustível para serem obtidas as características desejadas, tais como o bom desempenho a baixas temperaturas, qualidade de ignição, proteção contra desgaste ou como a limpeza de injetores e inibição de espuma.

Os combustíveis que excedem significativamente os níveis padrão impostos pela norma, são, normalmente, obtidos através do uso de componentes sintéticos como o GTL (*Gas-to-liquid*) da SMDS (*Shell Middle Distillate Synthesis*), que se apresenta como um gasóleo de elevada qualidade de ignição.

Os combustíveis sintéticos já haviam sido utilizados durante a Segunda Guerra Mundial quando *Franz Fischer* e *Hans Tropsch* utilizaram um processo semelhante para produzir gasóleo a partir do carvão devido à ausência de petróleo na Alemanha. O processo que mais tarde viria a ser chamado de processo de *Fischer-Tropsch*, em homenagem aos cientistas que o patentearam nos anos 20, converte, através de reações químicas, uma mistura de monóxido de carbono e hidrogénio em hidrocarbonetos líquidos. Este processo ainda hoje é usado por algumas empresas como a *SASOL* que o utiliza na produção de carvão liquefeito e gás de petróleo liquefeito.

Atualmente, a produção de gasóleo a partir de matérias-primas renováveis tem ganho uma boa perspectiva de sucesso. No futuro, espera-se que o biodiesel seja feito com recurso à planta por inteiro ou até mesmo resíduos orgânicos, diferindo do atual recurso às sementes de plantas (éster metílico de ácidos gordos ou *FAME- Fatty Acid Methyl Ester*). A União Europeia, com o intuito de diminuir as emissões de CO₂, estabeleceu uma concentração equivalente a 6.25% de *FAME*.

2.3.2. Composição

O petróleo bruto e os combustíveis obtidos a partir do mesmo são uma mistura de vários hidrocarbonetos que podem ser divididos em parafinas, naftenos, aromáticos e olefinas. Existem também outros compostos, como o enxofre, que estão presentes em baixas concentrações e é desejável que sejam removidos durante a produção do combustível.

Ao contrário dos motores a gasolina, os motores diesel precisam que o combustível possua hidrocarbonetos que facilitem a autoignição a elevadas pressões e temperaturas, designados por parafinas normais. Estas são uma mistura de hidrocarbonetos saturados que se apresentam em elevadas concentrações no petróleo bruto. Contudo, as suas fracas características de escoamento a frio, devido a apresentar-se no estado sólido à temperatura ambiente, são desvantajosas para o bom funcionamento do motor, sendo que os melhoradores de fluxo são uma das soluções encontradas para melhorar esta situação.

Contrariamente às parafinas normais, que facilitam a autoignição, as isoparafinas são inadequadas para um motor diesel, uma vez que apresentam elevada resistência à autoignição.

Os compostos aromáticos apresentam uma gama de pontos de ebulição de 80°C a 370°C, levando a que a maior parte dos aromáticos possa estar presente no gasóleo. Existem alguns compostos que, devido ao elevado ponto de ebulição, não estão presentes no gasóleo numa proporção de cerca de 15% a 25% do peso do combustível.

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs), e os seus derivados, são indesejáveis no gasóleo devido à sua fraca qualidade de ignição e por conduzirem a um aumento significativo de emissão de partículas, fator que se encontra bastante limitado pela União Europeia e pelos Estados Unidos da América.

2.3.3. Aditivos

Nos dias de hoje torna-se quase impossível a produção de gasóleo com os padrões desejados sem recorrer a aditivos. As propriedades contraditórias dos vários componentes do gasóleo são frequentemente regularizadas com o recurso a aditivos, sendo normal verificar uma maior quantidade e variedade dos mesmos neste tipo de combustível. Estes aditivos permitem satisfazer requisitos de segurança operacional, a taxa de libertação de calor e controlar a emissão dos gases de escape ao longo da vida útil do motor.

Os grupos mais importantes de aditivos são [6]:

- Melhoradores de fluxo e aditivos cerosos anti sedimentação que melhoram a competência do combustível a baixas temperaturas
- Melhoradores de ignição que encurtam o atraso da ignição e melhoram o desempenho da combustão

- Aditivos anti desgaste que protegem os bicos dos injetores e a bombas de injeção
- Aditivos anti espuma que impedem a formação de espuma quando o combustível é bombado
- Aditivos detergentes que mantêm limpos os bicos dos injetores e o sistema de combustível
- Antioxidantes, desoxidantes e desactivadores de metais que melhoram a estabilidade do armazenamento de combustível.

Os melhoradores de fluxo e aditivos cerosos anti sedimentação possibilitam o uso de componentes parafínicos no inverno. Apesar dos melhoradores de fluxo não conseguirem inibir a formação de cristais de parafina, conseguem reduzir o seu tamanho e impedi-los de coalescer.

Através deste tipo de aditivos é possível diminuir o CFPP⁵ – *Cold Filter Plugging Point* (ponto de obstrução do filtro a frio) e a sedimentação quando o combustível é armazenado abaixo do seu ponto de turvação (temperatura a partir do qual é alterada a sua transparência). Estes aditivos devem ser adicionados ainda na refinaria, quando o combustível está quente, pois a frio perdem a sua eficácia.

Os melhoradores de ignição, tais como os nitratos orgânicos, levam a um aumento do número de cetano⁶, refletindo-se positivamente na combustão e nas emissões de escape.

O uso dos aditivos anti desgaste/aditivos lubrificantes advém da necessidade de potenciar as capacidades naturais de lubrificação do combustível que se perde quando este é hidrogenado para a remoção do enxofre.

Os agentes anti espuma, facilitam o abastecimento de combustível e permitem que a bomba de abastecimento “dispare”, evitando o derrame de combustível e diminuindo os riscos de poluição ambiental.

Os aditivos detergentes ajudam a reduzir a deposição de resíduos carbonosos nos bicos de injeção e bombas injetoras, evitando uma contaminação destes resíduos no ciclo de combustão e reduzindo as emissões de gases de escape. Estes aditivos devem ser continuamente adaptados às evoluções tecnológicas dos sistemas de injeção e exigem que sejam realizados ensaios com os motores em condições de funcionamento realistas.

Os protetores anti corrosão são bastante úteis quando existe uma infiltração de pequenas quantidades de água no combustível. Esta infiltração pode resultar da condensação que se forma quando um motor fica parado durante um longo período de tempo.

⁵ CFPP (ponto de obstrução de filtro) é a temperatura mínima, expressa em °C, a que um determinado volume de combustível consegue passar num determinado filtro.

⁶ O número de cetano é um indicador da qualidade de ignição de um combustível diesel e mede a rapidez com que este combustível entra em ignição a uma dada pressão e temperatura.

Os antioxidantes são importantes para melhorar a estabilidade do armazenamento de combustível durante um tempo de paragem prolongado, impedindo a sua deterioração e retenção nos filtros e garantindo uma boa filtrabilidade. Já os desoxidantes são importantes para a rápida sedimentação de partículas de água que se encontrem dissolvidas no combustível.

Relativamente aos desactivadores de metal, estes impedem os efeitos catalíticos dos metais no envelhecimento do combustível. No entanto, com a hidrogenação do combustível (hidrocraqueamento, dessulfurização), este tipo de aditivos perdeu importância.

2.3.4. Normas Aplicadas ao Gasóleo

De forma a facilitar a comunicação entre fabricantes de motores e produtores de combustíveis, criou-se uma norma que regulariza os requisitos mínimos que um combustível deve apresentar.

Em 1993, ano em que a Norma Europeia (EN 590) reguladora do gasóleo entrou em função em todos os países representados pelo CEN (Comité Européen de Normalização), cada país tinha as suas especificações. Atualmente, nos países representados pelo CEN, o combustível é obrigado a cumprir determinadas normas, apesar de ser possível cada país decretar normas extraordinárias logo que publicadas na sua legislação. No caso dos países nórdicos, foram aplicadas normas especiais onde se especificaram as características de fluxo desejadas a baixas temperaturas, tais como o CFPP e o ponto de turvação.

A Norma Europeia EN 590 define cada parâmetro do combustível para que apresente um nível relativamente elevado de qualidade. Esta norma está sujeita a uma revisão regular de forma a serem modificados determinados parâmetros ou até adicionados novos, como por exemplo a proteção contra o desgaste e os limites máximos de aromáticos que mais recentemente começaram a ser legislados.

Os testes determinados pela versão de 2009, em vigor atualmente, podem ser visualizados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Requisitos e métodos de testes geralmente aplicado na EN 590, adaptado de [15].

Propriedade	Unidade	Limites		Método de teste
		Mínimo	Máximo	
Número de cetano		51	-	EN ISO 5165 EN 15195
Índice de cetano		46	-	EN ISO 4264
Densidade a 15°C	kg/m ³	820	845	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos	% (m/m)	-	11	
Teor de enxofre	mg/kg _{comb.}	-	50	EN ISO 20846
			até 31-12-2008	EN ISO 20847 EN ISO 20884
			10	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Ponto de inflamação	°C	Acima de 55	-	EN ISO 2719
Resíduos carbonos (em 10% de resíduo destilado)	% (m/m)	-	0.3	EN ISO 10370
Teor de cinza	% (m/m)	-	0.01	EN ISO 6245
Teor de água	mg/kg _{comb.}	-	200	EN ISO 12937
Contaminação total	mg/kg _{comb.}	-	24	EN ISO 12662
Corrosão de uma faixa de cobre (3 horas a 50°C)	Classificação		Classe 1	EN ISO 2160
Teor de éster metílico de ácidos gordos (FAME)	%(V/V)	-	7	EN 14078
Estabilidade de oxidação	g/m ³	-	25	EN ISO 12205
	h	20	-	EN 15751
Lubrificação, correção do diâmetro da marca de desgaste (wsd1.4) a 60°C	µm	-	460	EN ISO 12156-1
Viscosidade a 40°C	mm ² /s	2	4.5	EN ISO 3104
Destilação				
%(V/V) recuperada a 250 °C	%(VV)	85	<65	EN ISO 3405
%(V/V) recuperada a 350 °C				

Todos os métodos de teste necessários para se obter os parâmetros do combustível, são igualmente obtidos segundo determinadas normas.

3. Manutenção Condicionada

Neste capítulo são apresentados os conceitos da manutenção condicionada com recursos a sistemas de monitorização de condição, quais os principais parâmetros de monitorização de condição de motores diesel e quais as principais falhas observadas neste tipo de motores.

3.1. O Conceito

A manutenção condicionada, pressupõe que seja feita uma monitorização da condição do equipamento. Esta monitorização de condição prevê que sejam regularmente medidos determinados parâmetros, de modo a que possam ser analisados e seja possível decidir qual a melhor ação a tomar. Deste modo, é possível diminuir o número de intervenções e a sua duração, além de serem mais intercaladas, resultando na redução do tempo de paragem do equipamento e dos custos.

A Figura 3.1 ilustra o diagrama P-F que representa a deterioração da condição da máquina. Neste diagrama, destacam-se o ponto P, onde a falha pode ser detetada, e o ponto F, onde a máquina atinge a falha funcional e deixa de poder operar. Se a falha for detetada ente estes pontos, é possível intervir atempadamente e corrigir o que for necessário para que não se atinja a falha funcional. Este é o principal objetivo da manutenção condicionada.

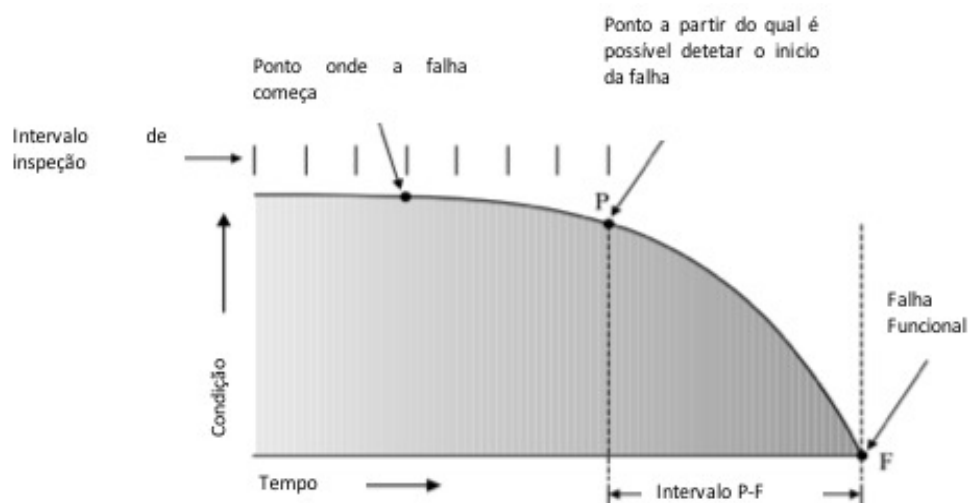


Figura 3.1 – Diagrama P-F representação do decaimento de condição, adaptado de [50].

De acordo com N.B. Jones e Yu-Hua Li [16], existem vários parâmetros/sinais relevantes a serem medidos nos motores diesel:

- **Pressão** – Pressão do cilindro, do sistema de combustível, do óleo, pressão de admissão e pressão de escape;
- **Temperatura** – A monitorização de um motor exige a medição de várias temperaturas, desde a temperatura ambiente até à de saída dos gases de escape;
- **Avanço/ rotações** – É um parâmetro importante que deve ser monitorizado, uma vez que permite detetar falhas na ignição e avaliar o rendimento do motor;
- **Vibração** – É um importante parâmetro para o diagnóstico de falhas mecânicas;
- **Partículas** – Análise de partículas presentes no óleo e nos gases de escape;
- **Qualidade de combustível/lubrificante** – A qualidade do lubrificante e do combustível afetam diretamente as emissões, potência e outros parâmetros de desempenho. A condição do combustível é determinada pela sua contaminação e aeração⁷. Através da aeração do combustível é possível aumentar-se o seu teor em oxigénio, melhorando a combustão e reduzindo as emissões (Figura 3.2) [4]. Quanto à condição do lubrificante, esta é determinada por outros parâmetros, tais como a viscosidade, nível de acidez/basicidade e presença de combustível ou de partículas. A viscosidade e as partículas metálicas presentes no lubrificante são os parâmetros mais importantes a serem monitorizados.

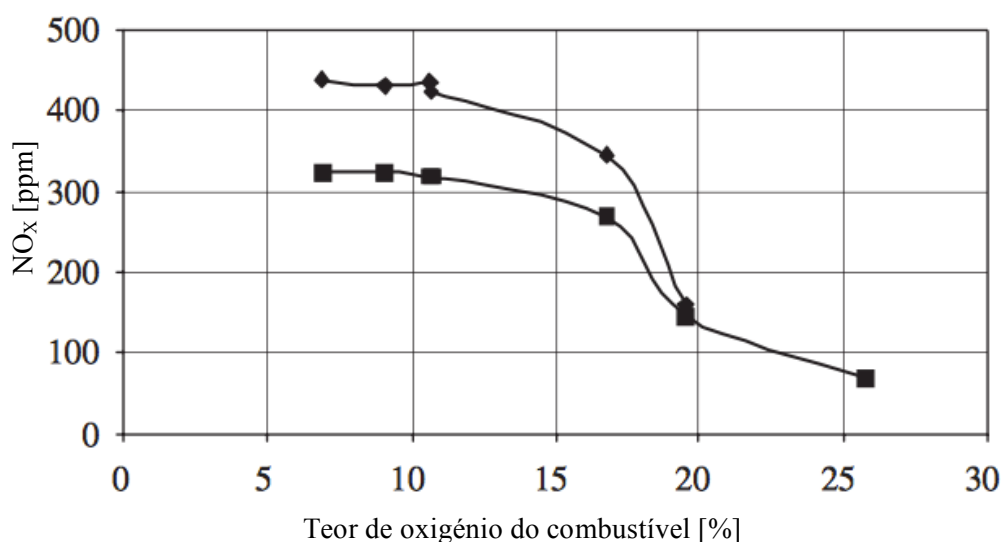


Figura 3.2 – Efeito do teor de oxigénio no combustível na emissão de NO_x para rotações: ■ 1200 rpm; ♦ 2000 rpm, adaptado de [4].

⁷ Aeração - Ato ou efeito de arejar; renovação do ar; ventilação; oxigenar.

3.2. Falhas em Motores Diesel

3.2.1. Falhas em Equipamentos de Injeção de Combustível

Da investigação às falhas do motor diesel verificou-se que uma grande parte dos motores falhou devido ao pistão agarrar (Figura 3.3) no revestimento do cilindro. Em alguns casos foram também encontrados pistões cuja coroa se encontrava deteriorada e outros mesmo até foram encontrados furos nesta. Este tipo de danos são típicos de uma falha relacionada com a combustão/injeção de combustível [17].



Figura 3.3 – Pistão agarrado [17].

A injeção de combustível na câmara de combustão num motor diesel é feita através de um injetor (Figura 3.4). Para que tal aconteça existe uma bomba que fornece combustível ao injetor enchendo o bico do injetor, quando o bico está cheio de combustível e à pressão desejada, a própria pressão do combustível faz com que a agulha se eleve, vencendo a força da mola que mantém fechada deixando passar o combustível. Com a injeção do combustível para a câmara de combustão, a pressão no interior do bico volta a baixar, permitindo então à mola que a agulha baixe e encoste na sede interrompendo assim o fornecimento de combustível. Quando a agulha é fechada existe uma porção de combustível que percorre o interior do injetor lubrificando a agulha e arrefecendo o injetor, este combustível posteriormente sai do injetor por um tubo de retorno, voltando assim para o depósito de combustível. Nos sistemas mais recentes de injeção a abertura da agulha deixa de ser comandada pela pressão de combustível passando a controlada electronicamente pela atuação de um solenoide.

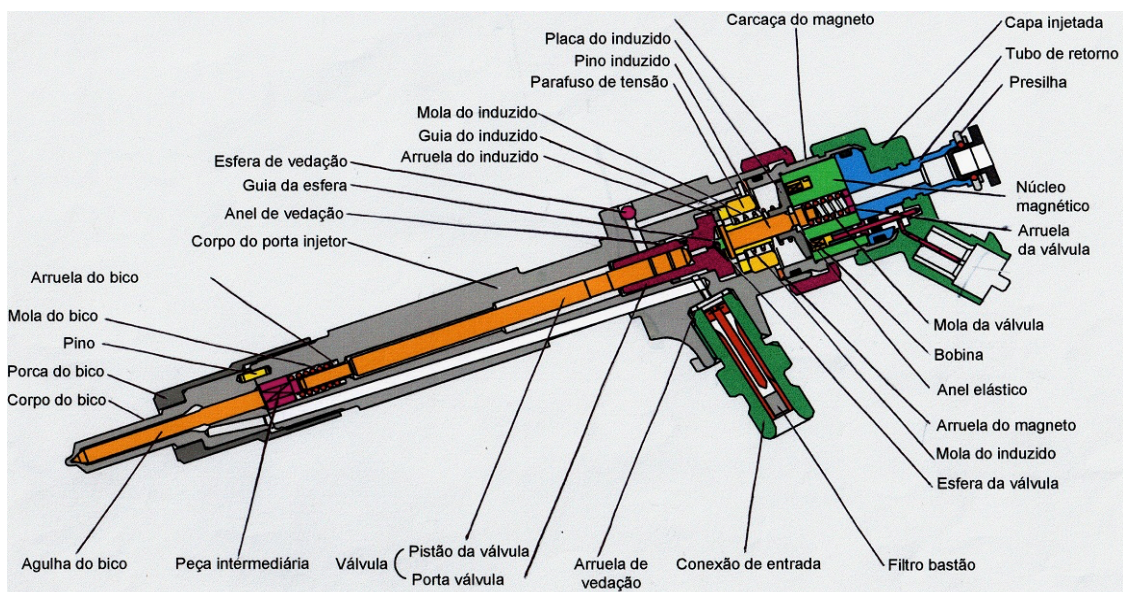


Figura 3.4 – Injetor *Common Rail Bosch* em pormenor, adaptado de [51].

Na maior parte destes casos, os injetores foram cuidadosamente removidos e testados em bancos de ensaio sendo verificado que alguns deles forneciam fluxos de combustível ao invés da normal pulverização, isto significava que as agulhas do injetor estariam presas.

Quando analisadas mais em pormenor, as agulhas apresentavam pontas descoloradas (Figura 3.5) e pretas e em muitos casos foi possível ver danos na haste da agulha (Figura 3.6).

As extremidades da agulha pretas e descoloradas são um sinal de que a agulha do injetor não se encontra a selar bem no assento na ponta do injetor permitindo assim que os gases de combustão entrassem para dentro da câmara da agulha causando então a descoloração da ponta da agulha através das excessivas temperaturas que eram atingidas.

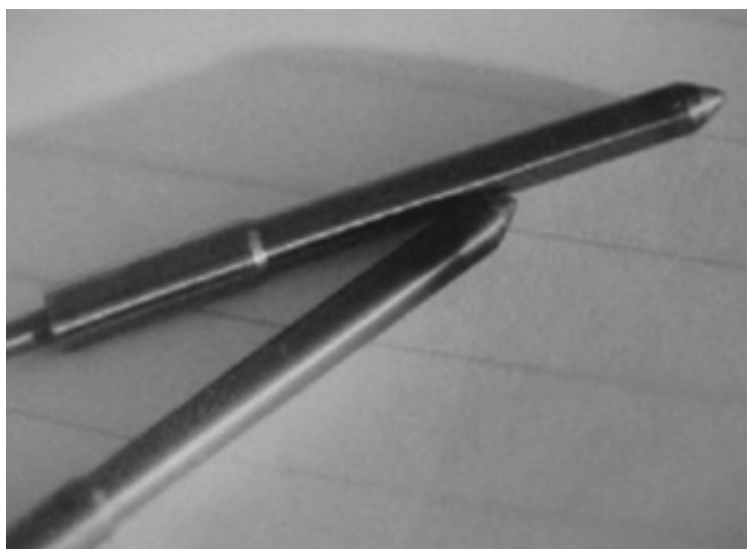


Figura 3.5 – Agulhas de injetor descoloradas [17].

Os danos na haste da agulha que foram detetados, foram causados pela fricção da agulha no injetor devido à ausência de lubrificação. Esta lubrificação deve ser garantida pelo combustível, sendo que partículas de sujidade no combustível agravam esta situação.

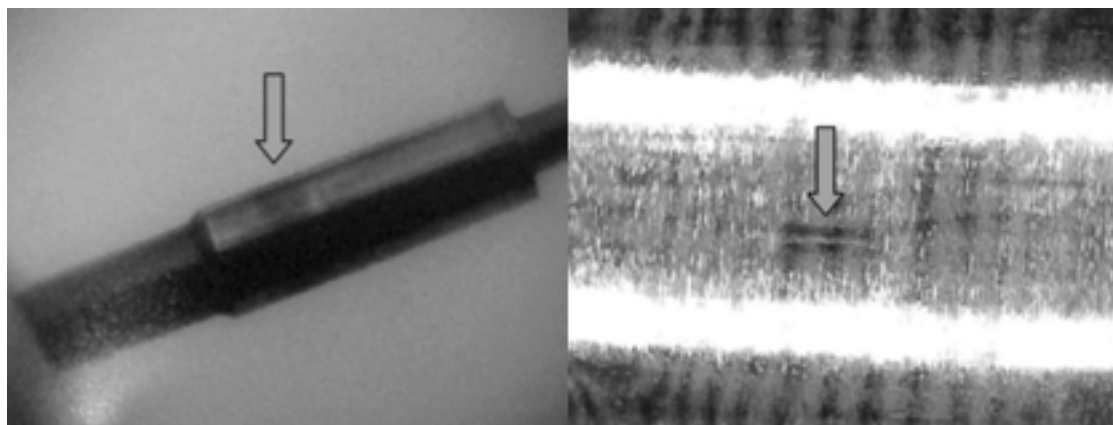


Figura 3.6 – Arranhões na agulha do injetor [17].

Para ocorrer a ignição do combustível injetado através das elevadas pressões exercidas na compressão, é necessário que o pistão se encontra montado no cilindro com um ajuste deslizante muito rigoroso e vedado pelos segmentos por forma a não haver fugas da parte superior do pistão para a parte inferior.

O combustível é entregue em quantidades definidas, a pressões muito elevadas e em pulverizações de gotículas (menores que 20) μm através de injetores. Estas condições só são possíveis fazendo o combustível passar por pequenos orifícios e utilizando elevadas pressões de injeção.

Normalmente a injeção inicia-se entre 25° a 10° antes do ponto morto superior e continua enquanto a combustão acontece e o pistão desce. A potência disponibilizada é controlada pela quantidade de combustível injetado e pela duração da fase de injeção.

A pulverização de combustível para a câmara de combustão, através dos injetores, é desejável que ocorra na forma de partículas pequenas, como foi dito anteriormente, isto porque o processo de combustão começa quando se dá a oxidação da parte exterior dessas gotículas de combustível. Portanto, quanto mais pequenas forem estas gotículas, a combustão acontece de uma forma mais rápida e eficaz.

Este fornecimento de pequenas gotículas de combustível é possível através da pressão a que o combustível se encontra no interior do injetor e porque existe na ponta deste uma agulha que se encontra fechada através da pressão feita por meio de uma mola e que quando esta abre por breves instantes, o combustível é forçado a passar pelo pouco espaço disponível em torno da agulha formando assim então uma pulverização de gotículas muito pequenas.

Segundo [17], existem duas causas para que esta pulverização de pequenas gotículas não aconteça:

- Fugas da agulha no assento da ponta do injetor
- Agulha do injetor presa

Quando a agulha não fecha adequadamente no assento da ponta do injetor, e devido às elevadas pressões do combustível no interior deste, o combustível começa a escorrer para fora provocando assim gotículas demasiado grandes ou até gotejamento na ponta do injetor.

A agulha do injetor por vezes prende não ficando esta livre para se deslocar na ponta do injetor fazendo com que a força exercida pela mola não seja suficiente para selar a agulha no assento ocorrendo assim um gotejamento ou pulverização indesejada (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Pulverização deficiente de um injetor [17].

Quanto estas pulverizações deficientes acontecem, segundo [17], levam à ocorrência de duas situações:

- Lavagem do filme de óleo que se encontra nas paredes do cilindro
- Derretimento do material da coroa do pistão

Quando um jato de combustível é projetado contra a parede do cilindro, a película de lubrificante que lá se encontrava é lavada, levando assim à fricção sem lubrificação do pistão e dos seus segmentos, resultando num maior coeficiente de atrito, ao aumento excessivo de temperatura, ao desgaste mais acelerado podendo até levar a que o pistão cole.

Por outro lado, quando a injeção de combustível é feita de forma deficiente (jato ou gotículas demasiado grandes) ao invés da pulverização de pequenas gotículas, o combustível atinge a coroa do pistão em vez de ficar em suspensão na câmara de combustão começando então o combustível começa a queimar na sua superfície levando ao seu sobreaquecimento. Este excessivo aumento de temperatura, no caso de pistões de alumínio, cuja sua temperatura de fusão pode ser atingida, fazendo com que este se deteriore e fazendo com que estas partes de material sejam expelidas pela válvula de escape. Podemos ver exemplos deste tipo de defeito na seguinte imagem (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Coroa de pistão danificada [17].

3.2.2. Degradação da Camada Lubrificante das Válvulas

Nos motores de quatro tempos, as válvulas de admissão abrem para deixar o ar entrar na câmara de combustão fechando-se de seguida para se dar a compressão. As válvulas de escape são fechadas durante esta fase abrindo-se posteriormente para que os produtos da combustão possam ser expelidos da câmara de combustão.

Os assentos de válvula estão sujeitos a uma situação de contacto exigente e complexa, sendo também que o fecho da válvula produz um impacto elevado da válvula contra a sede correspondente.

Quando a válvula se encontra fechada, a cabeça da válvula é sujeita a uma pressão bastante elevada fazendo com que esta sofra uma mudança de forma criando um micro deslizamento na interface de vedação [18]. Este movimento deslizante é considerado muitas vezes uma das principais causas de desgaste, além disso encontra-se junto ao local da

combustão o que significa que se encontra sujeita a elevadas temperaturas, especialmente a de escape pela qual repetidamente são passados os gases quentes produto da combustão.

Através de ensaios Wang *et al.* [19] descobriram que o desgaste adesivo, o desgaste abrasivo, o desgaste criado por tensões de corte e o desgaste por oxidação são predominantes num ensaio de simulação de assento de válvulas. Descobriram também que o desgaste aumenta proporcionalmente com o aumento da carga e número de ciclos, mas diminui com o aumento da temperatura. Este efeito foi reconhecido como sendo devido à formação acelerada de filmes de óxido, impedindo o contacto direto de metal com metal. Chun *et al.* [20] descobriram que o desgaste ocorre devido ao contacto direto de entre os metais básicos, contudo o desgaste foi diminuído por uma camada tribológica química formada por reação entre os metais básicos, o ar e os produtos da combustão.

Uma vez que normalmente as válvulas por norma não são substituídas devem suportar toda a vida útil, que num motor diesel de pesados está da faixa dos milhões de quilómetros, que em termos de ciclos de abertura e fecho de válvula é da ordem do milhar de milhão. Para um bom desempenho durante a vida útil do motor, a taxa de desgaste da superfície da válvula deve ser bastante baixa.

No caso mais extremo este desgaste pode levar a uma vedação deficiente da câmara de combustão, podendo ocorrer o vazamento desta e levar ao sobreaquecimento desta zona e consequentemente levar a um desgaste catastrófico.

Mesmo um desgaste lento e uniforme da válvula é inconveniente uma vez que leva à redução da capacidade de vedação da válvula. Este desgaste tem como consequência a diminuição da taxa de compressão e alteração do volume da câmara de combustão, tornando a combustão menos eficiente, levando ao aumento do consumo de combustível. Este decaimento na capacidade de vedação pode refletir-se numa quebra de potência da ordem dos 3% a 10% [21].

Nos motores atuais, as válvulas utilizadas conseguem manter esta taxa de desgaste relativamente baixa, em parte devido à formação de um filme de proteção nas superfícies de contato. Este filme é composto por resíduos de óleo de motor e combustível.

Forsberg *et al.* [22] desenvolveram um banco de ensaios especificamente para realizar estudos fundamentais sobre componentes das válvulas, sendo possível através deste tipo de testes reproduzir o filme que é formado entre as superfícies de contacto da válvula aquando o funcionamento do motor.

Uma vez que o filme é formado a partir de resíduos de combustão do óleo de motor e de combustível, a sua estrutura e composição são sensíveis à quantidade e tipo de aditivos presentes no óleo e no combustível [23].

As exigências quanto às emissões e partículas estão a aumentar através de novas legislações europeias que os veículos têm de respeitar. Para satisfazer estas exigências, o óleo

de motor e o combustível devem, preferencialmente, conter menos aditivos uma vez que estes não são queimados, mas formam partículas. Como resultado desta alteração, a capacidade de formação de filme protetora da válvula diminui levando a uma proteção reduzida das superfícies vedantes, acabando por produzir um desgaste intensificado ou até a uma falha prematura do motor. Esta situação constitui um desafio para os produtores de motores e de válvulas uma vez que se torna necessário saber como vai ser possível manter estes índices de desgaste baixos uma vez que a capacidade de formação de filme protetor é fortemente reduzida.

Em estudos anteriores, as superfícies da válvula foram estudadas quando o filme já estava completamente formado ou quando a superfície da válvula começou a desgastar-se indicando que o filme já havia sido removido, estudos estes que forneceram importantes informações, mas, contudo, limitadas sobre a formação deste filme protetor. Para completar estas informações, este teste [18] inclui os processos desde que o filme começa a ser formado ate ao ponto em que este se desgasta até desaparecer.

O teste proposto por Elo *et al.*, consiste em inserir a válvula e a respetiva sede no equipamento de teste com uma mola que mantém a válvula na posição aberta, posteriormente um *pushrod*⁸ fecha a válvula com uma força de 20 kN a uma frequência de 6 Hz. Todo este sistema é aquecido por duas fontes, um aquecedor resistivo em torno do *pushrod* a cerca de 750°C e uma pistola de ar quente com um caudal de 500 l/min a uma temperatura de 600°C. Um bico de pulverização permite alimentações controladas de óleo na corrente de ar quente. Os parâmetros como a temperatura, a força de fecho da válvula e a frequência com que é fechada foram seleccionadas para replicarem o estado de funcionamento de um motor.

Para estudar os estágios iniciais da formação do filme protetor os testes foram realizados para 10, 100, 1 000, 10 000 e 100 000 ciclos de abertura e fecho da válvula com uma adição de 0.5 ml/min de óleo na corrente de ar quente.

Para ser possível a análise da quebra do filme protetor, foi feito um ensaio para 10 000 ou 100 000 ciclos com adição de uma névoa de óleo de motor, seguidos de outros 1 000 ou 10 000 sem adição de óleo.

No funcionamento normal de um motor, as válvulas não são intencionalmente lubrificadas, contudo são sujeitos a partículas de resíduos de óleo de motor, como partículas de óleo que são puxadas para o topo da câmara de combustão pelos segmentos do pistão ou fugas através do sistema de guia de válvula.

Esta disponibilização às partículas de óleo é uma situação que depende do estilo de condução, ajuste entre componentes, temperatura do óleo e outros parâmetros.

Após os testes foi analisado o aspeto geral das superfícies da válvula e assento da válvula através de um microscópio.

⁸ *Pushrod* – vareta de atuação usada para comandar a abertura e fecho de válvulas em motores com árvore de cames lateral ou central.

Através deste conjunto de ensaios foi possível realizar uma melhor abordagem sobre a dinâmica de formação e rutura do filme protetor sobre as superfícies da válvula. Apesar de o número de ciclos das diferentes fases ser apenas representativo para as condições de teste a que foi sujeito, torna-se possível fazer uma estimativa aproximada de quanto tempo pode demorar a formar-se e a desgastar o filme protetor. Como foi dito anteriormente, os motores não possuem um fornecimento controlado de partículas de óleo para a válvula, este depende de várias variáveis. Neste ensaio as variáveis foram substituídas por um esquema simples que consiste em iniciar a partir de superfícies limpas, não utilizadas e pré-aquecidas, seguido pelo funcionamento com um fornecimento constante de névoa de óleo e por fim funcionar sem qualquer funcionamento de lubrificante.

Ao realizar-se este tipo de ensaio é possível dividir-se a dinâmica do filme protetor em quatro fases distintas:

1. Inicialmente as partículas dispersas da névoa de óleo ficam retidas entre as superfícies de fecho da válvula. À medida que mais partículas vão ficando retidas aglomeram-se e forma uma película gradualmente mais abrangente. O processo de compactação das partículas deve-se a uma combinação da pressão de fecho da válvula e o micro deslizamento entre as superfícies da válvula.
2. Quando uma grande parte da superfície fica coberta, uma fase de equilíbrio é atingida. A espessura do filme protetor mantém-se relativamente constante e desde que sejam fornecidas novas partículas de óleo, as superfícies ficam cobertas e protegidas do desgaste. Podem ser observados dois tipos de filme diferentes, um baseado no carbono e outro em aditivos nomeadamente cálcio e fósforo. Este segundo apresenta-se numa menor parte da superfície e inclui outros elementos como oxigénio e carbono. O filme de carbono é mais espesso que o de aditivos apresentando uma espessura da ordem das dezenas de micrómetros, por outro lado o de aditivos apresenta espessuras inferiores a 2 μm .
3. Quando o fornecimento de partículas de óleo é interrompido, o filme protetor começa a degradar-se. Por ser mais espesso, o filme de carbono é o primeiro a ser removido sendo que ao fim de cerca de 1.000 ciclos de abertura e fecho já não é possível vê-lo. O filme de aditivos é substancialmente mais estável que o de carbono.
4. Por fim, e quando também a película de aditivos já está praticamente removida, as superfícies da válvula ficam significativamente desgastadas apresentando superfícies deformadas e oxidadas. Foi possível observar a coexistência de duas fases, uma vez que é possível que num lado da válvula o filme esteja

praticamente a ser movido enquanto que do outro lado já foi totalmente removido e o desgaste da válvula já se tinha iniciado.

Este estudo concluiu também que as qualidades protetoras do filme de aditivos foram melhoradas significativamente prolongando a fase de equilíbrio, isto é, prolongando o fornecimento de partículas de óleo criando assim um filme mais abrangente e durável. Concluiu-se também que o filme de carbono tem propriedades protetoras muito fracas e apresenta uma durabilidade mais baixa quando comparado com o de aditivos. É comum os fabricantes de motores fazerem investimentos para calcularem com a folga ideal entre a haste da válvula e a respetiva guia para garantirem o acesso controlado de lubrificante a essa zona.

Foi assim possível estudar a durabilidade e propriedades de proteção deste tipo de filmes. Também foi possível mostrar que este tipo de filme oferece uma proteção eficiente durante um grande numero de ciclos mesmo quando não é possível a formação de novo filme. Este ensaio sugere uma oportunidade de usar diferentes formas de estágios de formação controlada para estabelecer uma tribologia de proteção. Isto oferece uma solução para aumentas a longevidade das válvulas e ao mesmo tempo reduzir as emissões de partículas.

3.2.3. Falha de Apoios da Cambota

A fiabilidade dos motores diesel, como outras máquinas, depende da adequação das suas partes móveis e é aqui que os apoios de chumaceira desempenham um papel muito importante. Uma análise feita a 410 defeitos registados ocorridos em motores diesel industriais durante um ano, revelam que os defeitos em apoios representavam 7% das ocorrências. Outro estudo sobre falhas de motores diesel, baseado na análise de 800 avarias durante um período de 4 anos revela que 12% dos danos estão relacionados com apoios/rolamentos do motor. Um terceiro estudo indica que nas falhas dos motores de combustão interna, 24.4% estariam relacionados com apoios/rolamentos [24].

Segundo Vencl *et al.* as falhas no apoio da cambota podem dever-se a uma falha tribológica ou a uma falha mecânica. Na figura seguinte (Figura 3.9) pode ser visto, de forma esquematizadas as causas de que levam a este tipo de falhas.

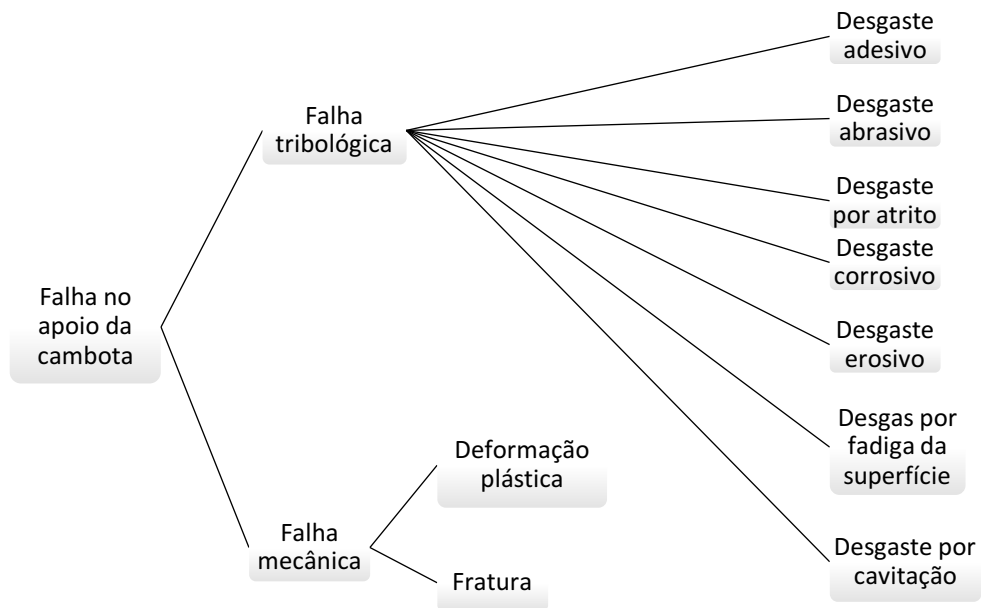


Figura 3.9 – Esquema das causas de falha de apoios de cambota, adaptado de [24].

Na Figura 3.10 podem ser vistas as causas de desgaste adesivo. A sobrecarga dos apoios e vibrações pode levar à quebra do filme de óleo enquanto que uma falha na montagem ou uma falha no projeto levar a uma limpeza deficiente. Esta limpeza insuficiente juntamente com a quebra do filme de óleo, um fornecimento insuficiente de lubrificante e uma baixa viscosidade deste podem levar ao que dá o nome de desgaste adesivo.

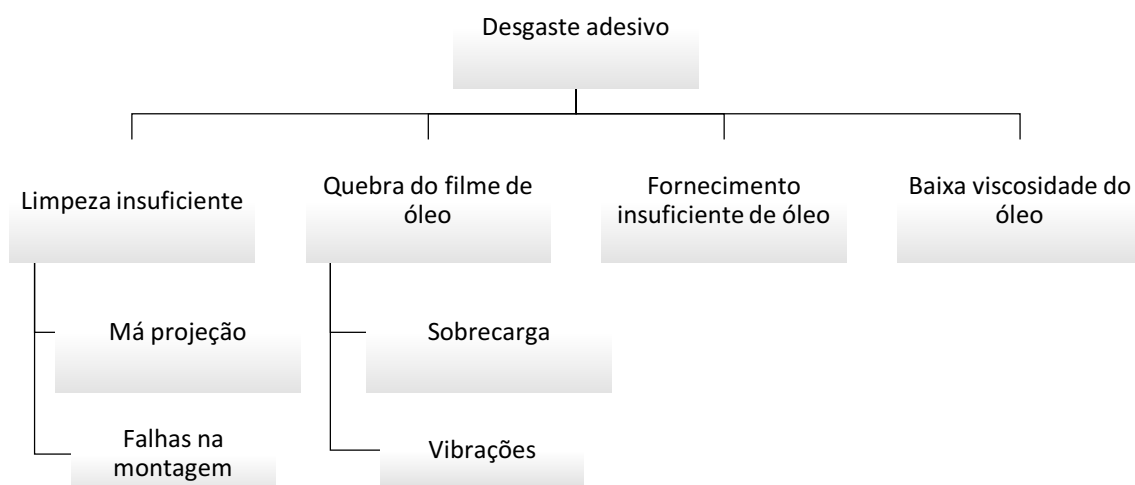


Figura 3.10 – Causas do desgaste adesivo dos apoios de cambota, adaptado de [24].

O desgaste abrasivo (Figura 3.11) pode resultar por uma filtração insuficiente do lubrificante, levando à sua contaminação com partículas de desgaste. Uma filtração insuficiente aquando o funcionamento em ambiente poeirento pode levar à contaminação do lubrificante com partículas estranhas ao motor.

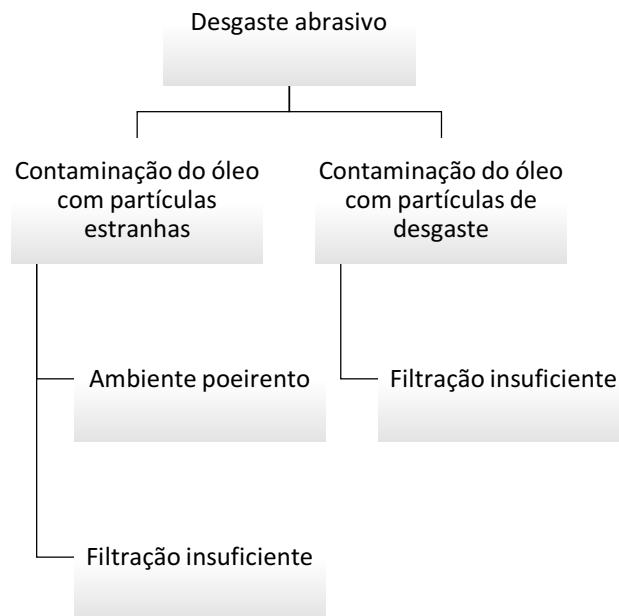


Figura 3.11 – Causas do desgaste abrasivo dos apoios de cambota, adaptado de [24].

As vibrações radiais da cambota e vibrações de baixa frequência do apoio são as principais causas de desgaste por atrito (Figura 3.12). Estas vibrações na maior parte advêm do desgaste de apoios/rolamentos da cambota.

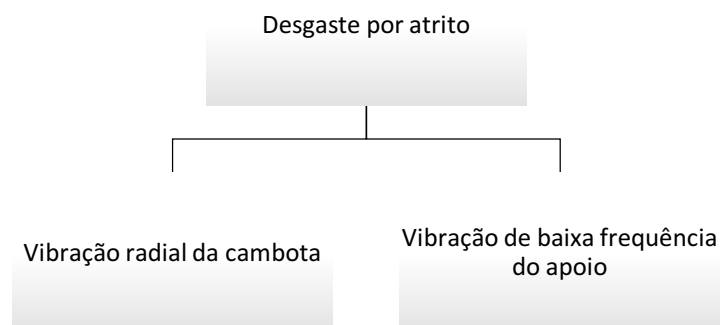


Figura 3.12 – Causas do desgaste por atrito dos apoios de cambota, adaptado de [24].

A seleção de materiais inadequados para o apoio da cambota ou a degradação térmica do lubrificante podem levar a um desgaste corrosivo do apoio da cambota (Figura 3.13).

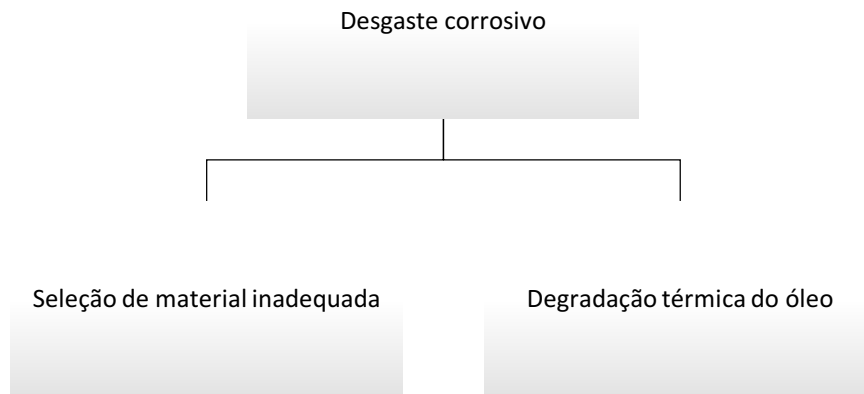


Figura 3.13 – Causas do desgaste corrosivo dos apoios de cambota, adaptado de [24].

Quanto ao desgaste erosivo pode ser causado por uma seleção inadequada do material do apoio ou por um elevado fluxo do lubrificante. (Figura 3.14).

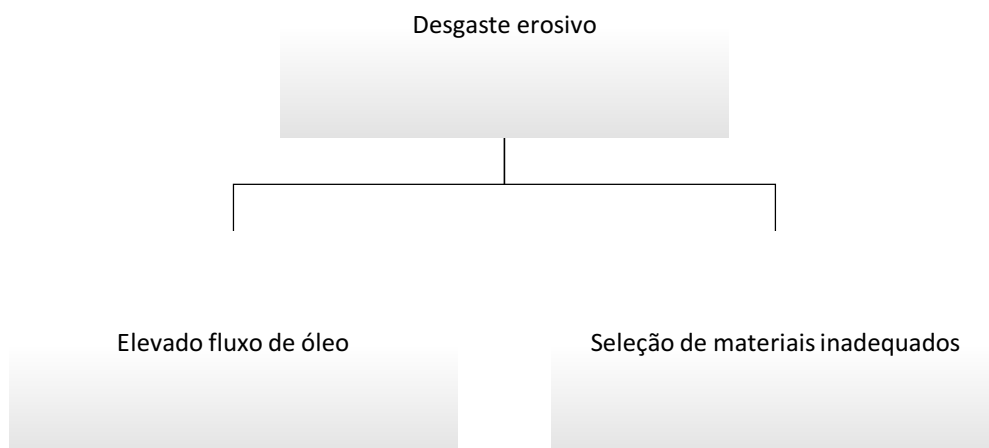


Figura 3.14 – Causas do desgaste erosivo dos apoios de cambota, adaptado de [24].

O desgaste por fadiga da superfície (Figura 3.15) pode ocorrer devido à tensão de fadiga do material de revestimento do apoio ser insuficiente, desalinhamento ou por uma carga que excede a tensão de fadiga do apoio.

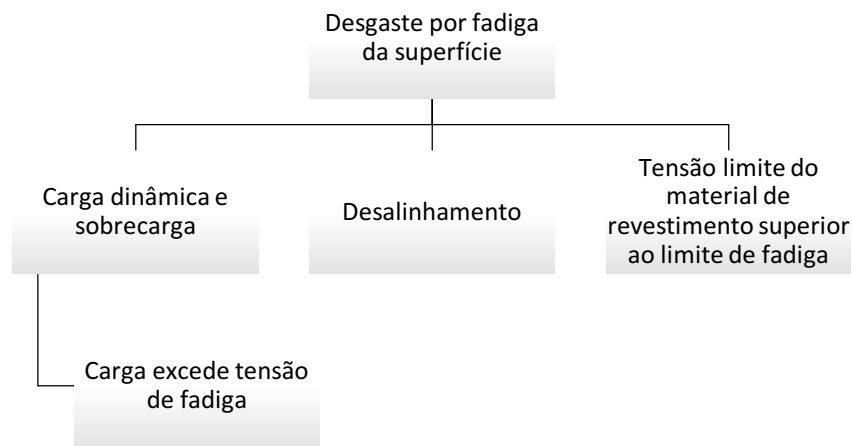


Figura 3.15 – Causas do desgaste por fadiga da superfície dos apoios da cambota, adaptado de [24].

Outro tipo de desgaste que pode levar à falha do apoio da cambota é o desgaste por cavitação (Figura 3.16). Dureza insuficiente dos revestimentos dos apoios, a interrupção do fluxo de óleo devido a furos e entalhes juntamente com a flutuação da pressão de lubrificante devido a vibrações de cambota são as principais causas de desgaste por cavitação.

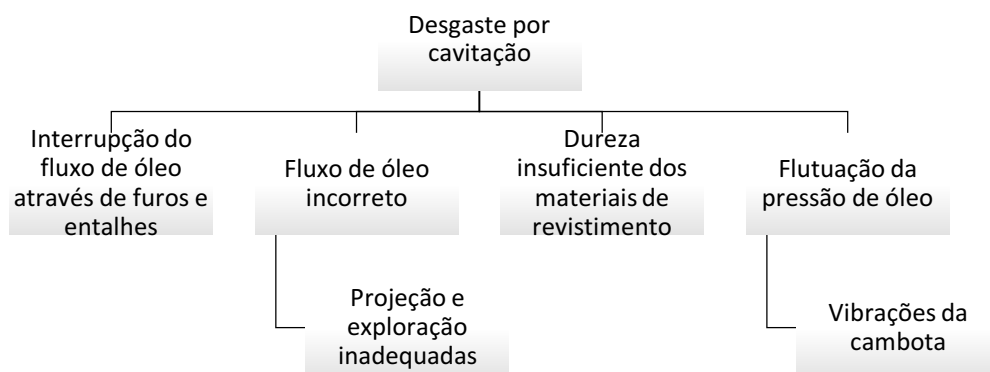


Figura 3.16 – Causas do desgaste por cavitação dos apoios de cambota, adaptado de [24].

A baixa viscosidade do lubrificante, o fornecimento insuficiente de óleo entre outras falhas são as principais causas de deformação plástica do apoio de cambota. As causas mais frequentes da fratura destes apoios são a sobrecarga ou cargas de impacto que possam ser sujeitos ou a fraca ligação que possam ter. A deformação plástica e as fraturas são as causas da maior parte das falhas mecânicas (Figura 3.17) observadas nos apoios de cambota.

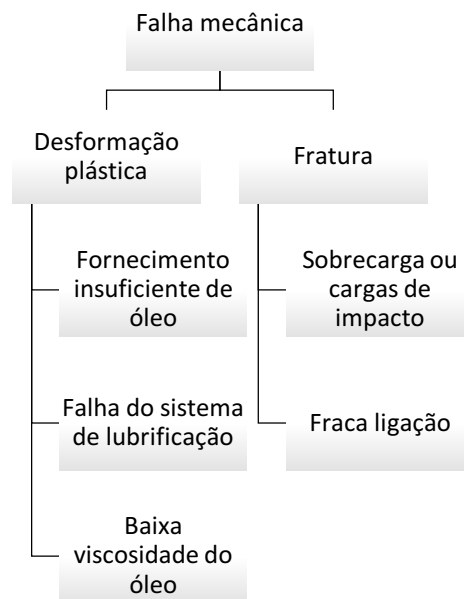


Figura 3.17 – Causa da falha mecânica dos apoios de cambota, adaptado de [24].

3.2.4. Estatística das Falhas Mais Comuns

Muitos autores dedicaram-se ao estudo das várias falhas dos motores diesel, enquanto outros se focaram em estudos mais específicos.

R.A. Collacott [25] construiu uma tabela (Tabela 3.1), onde se podem observar as falhas/defeitos ocorridos em motores diesel (de médio e grande porte) e a sua respetiva percentagem de ocorrência.

Tabela 3.1 – Lista das falhas de motores diesel e a sua percentagem de ocorrência, adaptado de [25].

Tipo de defeito	Ocorrência (%)
Equipamentos de injeção e de abastecimento de combustível	27,0
Fugas de água	17,3
Válvulas e sedes de válvulas	11,9
Rolamentos e apoios	7,0
Conjunto dos pistões	6,6
Fugas de óleo e sistema de lubrificação	5,2
Turbocompressores	4,4
Engrenagens e acionamentos	3,9
Componentes do regulador de velocidade	3,9
Fugas de combustível	3,5
Fugas de ar	3,2
Ruturas e fraturas, além das mencionadas	2,5
Diversos	2,5
Apoios do motor	0,9
Cambota	0,2
	100,0

Jones e Li [16] também elaboraram uma tabela (Tabela 3.2) onde se podem observar as principais falhas e os parâmetros que devem ser medidos para monitorizá-las.

Tabela 3.2 – Falhas e respetivos sinais a ser medidos e organizados por componentes, adaptado de [16].

Componentes	Falhas	Sinais medidos
Equipamento de injeção de combustível	<i>Timing</i> incorreto	
	Pressão incorreta	
	Fugas	
	Injetor desgastado ou entupido	
Pistão, cilindro e segmentos	Falha na ignição	Velocidade de rotação
	Blow-by ⁹	Pressão cilindro, óleo e combustível
	Bater	
	Arranhão	
	Segmentos defeituosos	Temperatura dos pistões
Sistema de lubrificação	Perda de potência	
	Pressão de óleo incorreta	Óleo
	Temperatura elevada do lubrificante	Líquido de refrigeração
	Contaminação do óleo	
	Degradação do óleo	
Sistema de admissão e escape		<i>Timing</i>
		Análise de partículas
	Obstrução do filtro de ar	Viscosidade do lubrificante
	Fuga	Acidez do lubrificante
	Emissões elevadas	
Permutador de calor		Fumo
		Vibração
Sistema mecânico	Temperatura do líquido de refrigeração elevada	Medição da temperatura do líquido de refrigeração
	Desgaste de rolamentos	Análise de partículas metálicas no lubrificante

⁹ *Blow-by* é o nome que se dá ao fenómeno da passagem de gases da câmara de combustão para o cárter, ou seja, passam da parte de cima do pistão para a parte de baixo.

3.3. Possíveis Métodos de Monitorização

3.3.1. Análise do Óleo de Motor

Nos finais da década de 40, a indústria apercebeu-se da vantagem na análise de diversos metais presentes no lubrificante, pois através da análise da mudança da concentração de metais de desgaste, a manutenção poderia ser antecipada evitando assim a falha crítica ou o baixo rendimento do motor. É de salientar que os antigos espectrógrafos de emissão, que envolviam técnicas mais complexas apenas forneciam alguns dados no prazo de um dia, mesmo assim foram importantes até ao aparecimento da instrumentação automatizada que chegaria praticamente uma década depois [26].

Atualmente em laboratório, é possível fazer a análise espectrométrica de 20 ou mais elementos individualmente. Esta informação adicional sobre o lubrificante, fez com que dois conjuntos de parâmetros ganhassem uma significativa importância na monitorização do lubrificante:

- Contaminação (produtos externos à formulação inicial do lubrificante)
- Degradação (decaimento das propriedades do lubrificante)

De seguida serão apresentados métodos analíticos para monitorizar a contaminação do lubrificante por fuligem de combustível, água, glicol e combustível, bem como a deterioração do lubrificante por oxidação, nitração, cisalhamento e diminuição dos aditivos e a acumulação de partículas de desgaste do motor.

Para a análise e medição da contaminação do lubrificante com partículas de fuligem de combustível, que são uma consequência natural do ciclo de combustão do motor diesel poderia recorrer-se a vários métodos. Estes tipos de partículas são extremamente finos (abaixo de $1\mu\text{m}$), tornando o processo de filtragem pouco económico. Por outro lado, poderia recorrer-se a medição das partículas através de centrifugação, mas o aparecimento dos aditivos tornou a centrifugação difícil. Existem químicos com a capacidade de tornarem estas pequenas partículas em outras de maior dimensão para que possam ser centrifugadas, mas a existência de restrições ambientais limita o seu uso.

É então que surgem as análises termogravimétricas (*TGA - Thermogravimetric Analysis*) e a espectroscopia de infravermelhos. A análise termogravimétrica é um teste com elevada precisão que envolve a análise da combustão e o peso dos seus resíduos. Quanto à análise de espectrometria infravermelha (com recurso a *FFT-Fast Fourier Transforms*) fornece informações sobre a estrutura molecular dos componentes bases, aditivos e contaminantes dentro do lubrificante. Esta abordagem é menos demorada que a *TGA* e, portanto, mais adequada para a monitorização rotineira do lubrificante.

A contaminação de um lubrificante com água é facilmente detetada num lubrificante de hidrocarbonetos padrão uma vez que esta não se mistura com o lubrificante. Um nível de água acima do admissível é um dos principais causadores de uma lubrificação inadequada. Através de análises por infravermelhos ou por processos de titulação específicos é possível obter uma abordagem mais quantitativa da presença deste contaminante no lubrificante. Através da análise por infravermelhos é possível detetar presença de água acima de 1000 ppm, existindo também outros processos de titulação, como o de Karl-Fischer que, apesar de apresentarem uma maior precisão, são menos utilizados.

Quanto à contaminação do lubrificante com líquido de refrigeração pode ser detetada através de uma análise de infravermelhos, uma vez que através desta técnica é possível isolar os agrupamentos funcionais do glicol (líquido de refrigeração). Através de métodos colorimétricos, é possível detetar elementos como sódio, potássio e boro que são indicadores da presença de líquido de refrigeração no lubrificante. Contudo, a análise deve ser feita em comparação com um lubrificante novo, uma vez que não deve ser confundida a presença destas substâncias com os aditivos já presentes no lubrificante.

Devido a falhas mecânicas como segmentos desgastados, pistões desgastados e padrões de pulverização deficiente por parte dos injetores, pode acontecer que o combustível passe para o cárter fazendo com que este fique junto do lubrificante. Existem 3 formas de analisar a presença de combustível no lubrificante. Uma das técnicas é a medição do ponto de inflamação (*flash point*), esta forma de análise trata-se de um teste simples em que a amostra de lubrificante é colocada num copo, sendo este posteriormente aquecido enquanto uma pequena chama é passada junto do lubrificante. Quando o ponto de inflamação detetado for mais baixo do que o lubrificante apresentava antes de usado, significa que existe combustível no lubrificante. Outra forma de análise seria por infravermelhos, mas uma vez que as moléculas de combustível são semelhantes às moléculas do lubrificante, mas mais pequenas torna-se complicada a análise com recurso a esta técnica. No entanto, a técnica mais viável e precisa trata-se da cromatografia gasosa, esta técnica garante uma precisão de deteção de combustível da ordem dos 1.5% de combustível por volume de lubrificante.

A degradação do lubrificante trata-se do decaimento de algumas propriedades que este deveria apresentar como é o caso da viscosidade, a depleção ou degradação de aditivos ou a presença de partículas de desgaste.

A viscosidade é dos mais importantes parâmetros de um lubrificante, sendo que esta se deve apresentar constante durante o seu tempo útil de vida. Uma vez que a viscosidade se trata da resistência do fluxo em relação a temperatura, os métodos de inspeção recorrem a canais de fluxo altamente calibrados e a dispositivos de aquecimento constante. Existem, no entanto, situações que levam ao espessamento ou diluição do lubrificante. De salientar a oxidação e nitratação do lubrificante como precursores de espessamento. A oxidação do lubrificante é a

reação do oxigénio com a estrutura molecular do lubrificante, normalmente acompanhada por um aumento significativo da viscosidade culminando numa perda da eficácia lubrificante. O mesmo acontece na nitrção, mas com nitrogénio (NOx) proveniente dos gases de combustão. Quanto a percursores de fluidez é de destacar a contaminação com combustível ou a degradação dos aditivos do lubrificante. Os óleos multigraduados são constituídos por aditivos para minimizar a alteração da viscosidade com a temperatura, ou seja, melhorar o índice de viscosidade. Durante o funcionamento do motor, estes aditivos são desfeitos em estruturas moleculares menores resultando numa perda de viscosidade nas temperaturas de operação do motor.

Outra possível degradação das condições do lubrificante é a degradação de aditivos, os aditivos desempenham um papel importante na lubrificação dos novos e quando o seu nível ou capacidade é reduzido a sua eficiência pode estar comprometida. A redução dos aditivos antioxidantes, anti desgaste e dispersantes e a precipitação dos aditivos devido à contaminação com água é uma das formas de degradação de aditivos. Como esses parâmetros são difíceis de controlar em testes laboratoriais simples recorre-se ao numero total de basicidade (*Total Base Number – TAN*) que é uma propriedade necessária para a neutralização e controlo de ácidos sulfurosos resultantes da combustão.

Na Tabela 3.3 podemos ver o tipo de contaminação do lubrificante, a principal fonte desse contaminante e quais as causas dessa contaminação.

Na Tabela 3.4 da pagina seguinte, pode ser vista uma tabela causa-efeito em função do parâmetro medido e ensaio realizado.

Tabela 3.3 – Contaminação do óleo de motor diesel [27].

Tipo	Principais Fontes	Principais Problemas
Partículas metálicas	Desgaste do motor	Abrasão, fadiga e degradação do óleo
Óxidos de metais	Desgaste do motor e corrosão	Abrasão e corrosão por fadiga
Pó e sedimentos	Passagem de gases de combustão para o cárter	Abrasão e fadiga
Fuligem	Passagem de gases de combustão para o cárter	Degradação do óleo
Gases de escape	Passagem de gases de combustão para o cárter	Degradação do óleo
Combustível	Falha da bomba de combustível	Degradação do óleo
Água	Falha da bomba de água	Corrosão e degradação do óleo
Ácidos	Passagem de gases de combustão para o cárter; quebra e degradação do óleo	Corrosão

Tabela 3.4 – Tabela de causa-efeito em função das medições e testes realizados, baseado [28].

Teste	Medição	Causa	Efeito
Oxidação	Contaminação e condição do lubrificante	Contaminação do óleo	Redução da vida do equipamento
		Degradação do óleo	Depósitos de verniz/esmalte
		Tipo de óleo inadequado	Entupimento do filtro de óleo
		Produtos da combustão	Aumento da viscosidade do óleo
		<i>Blow-By</i>	Corrosão de componentes metálicos
Nitração	Contaminação e condição do óleo	Fugas de líquido de refrigeração	Aumento do desgaste
			Redução da vida do equipamento
		Temperatura da combustão	Aceleração da oxidação
		Rácio de mistura pobre	Aumento das emissões de escape
		<i>Blow-By</i>	Formação de subprodutos ácidos
		Injetor ou carburador	Aumento do desgaste do cilindro
		Problema na válvula EGR	Aumento do desgaste das válvulas
TAN (conteúdo ácido do óleo)			Espessamento do óleo
			Aumento do TAN
		Elevado nível de enxofre do combustível	Corrosão dos componentes metálicos
		Sobreaquecimento	Aumento da oxidação
		<i>Blow-By</i>	Degradação do óleo
TBN	Vida útil do óleo (para baixo níveis de TBN)	Drenagem prolongada do óleo	Espessamento do óleo
		Óleo impróprio	Depleção dos aditivos
		Elevado nível de enxofre do combustível	Aumento do TAN
		Sobreaquecimento	Degradação do óleo
		Drenagem prolongada do óleo	Aumento de água no óleo
		Óleo impróprio	Corrosão dos componentes metálicos
		Acumulação de ácidos no óleo	

O contacto entre os vários componentes metálicos é uma situação típica de qualquer sistema mecânico, este contacto gera um desgaste nestes componentes e resulta na formação de pequenas partículas metálicas. Num motor diesel, as partículas de dimensão maior ficam retidas no filtro enquanto que as de dimensões mais reduzidas acabam por ficar em suspensão no lubrificante. Além destas partículas metálicas, encontram-se também partículas não metálicas como as de fuligem resultantes da combustão. A análise de partículas presentes no lubrificante pode ser feita com recurso a várias técnicas, como a análise espectrométrica, ferrografia direta e ferrografia analítica.

Contudo segundo [26], o grande inconveniente da análise espectrométrica é que para maiores dimensões de partículas os espectrómetros são incapazes de as detetar. Por exemplo, para partículas com uma dimensão de 10 µm os espectrómetros foram incapazes de detetar as partículas devido à incapacidade de vaporizar partículas de maiores dimensões. Na tabela seguinte (Tabela 3.5), pode ver-se as partículas detetadas na análise espectrométrica e a sua origem.

Tabela 3.5 – Fontes de partículas de desgaste detetadas na espectrometria, adaptado de [29].

Material das partículas	Origem das partículas
Alumínio	Pistões; rolamentos; carcaça do turbo
Cobre	Apoios de cambota
Crómio	Segmentos; revestimento do cilindro
Ferro	Revestimento do cilindro; cambota; componentes auxiliares; segmentos; árvore de cames
Chumbo	Rolamentos
Molibdénio	Segmentos
Níquel	Válvulas
Prata	Rolamentos
Estanho	Rolamentos
Silício	Sujidade aspirada; areia de fundição

A análise ferrográfica que é um dos testes mais utilizado para a análise de partículas dos óleos, devido à precisão que proporciona na deteção de partículas. A técnica consiste em colocar uma pequena amostra de lubrificante num plano inclinado, plano este que se encontra sujeito a um campo magnético. Enquanto a amostra vai deslizando pelo plano inclinado as partículas metálicas vão ficando no plano inclinado, primeiro as maiores e depois as mais pequenas, posteriormente estas são analisadas ao microscópio. Uma das grandes vantagens desta técnica é a possibilidade de ver diretamente a morfologia e dimensão das partículas. Na tabela seguinte (Tabela 3.6), pode ver-se as partículas que se encontram em suspensão no lubrificante e podem ser detetadas através da ferrografia.

Tabela 3.6 – Fontes de partículas de desgaste em suspensão no lubrificante detetadas na ferrografia, adaptado de [29].

Material das partículas	Origem das partículas
Ferro fundido; crómio	Revestimento do cilindro
Ferro fundido; crómio; molibdénio; cobre	Segmentos
Alumínio, liga de silício, ferro fundido maleável, revestimento de estanho ou chumbo	Pistão
Liga de aço de baixo teor de carbono	Cambota
Chumbo-Estanho; Cobre-Chumbo-Estanho; Índio; Alumínio-Silício; Alumínio-Estanho; Cádmio	Apoios de cambota
	Capa de biela
	Rolamento da cavilha do pistão
Bronze fosforoso; Alumínio-Estanho; Cobre-Chumbo	Rolamentos axiais de cambota
Ferro fundido	Árvore de cames
Aço de elevada liga, níquel	Válvulas
Bronze fosforoso, liga de aço de baixo teor de carbono	Acionamentos auxiliares

Na Figura 3.18, pode ser vista a comparação entre os diferentes tipos de ensaios existentes para a análise de partículas presentes no lubrificante.

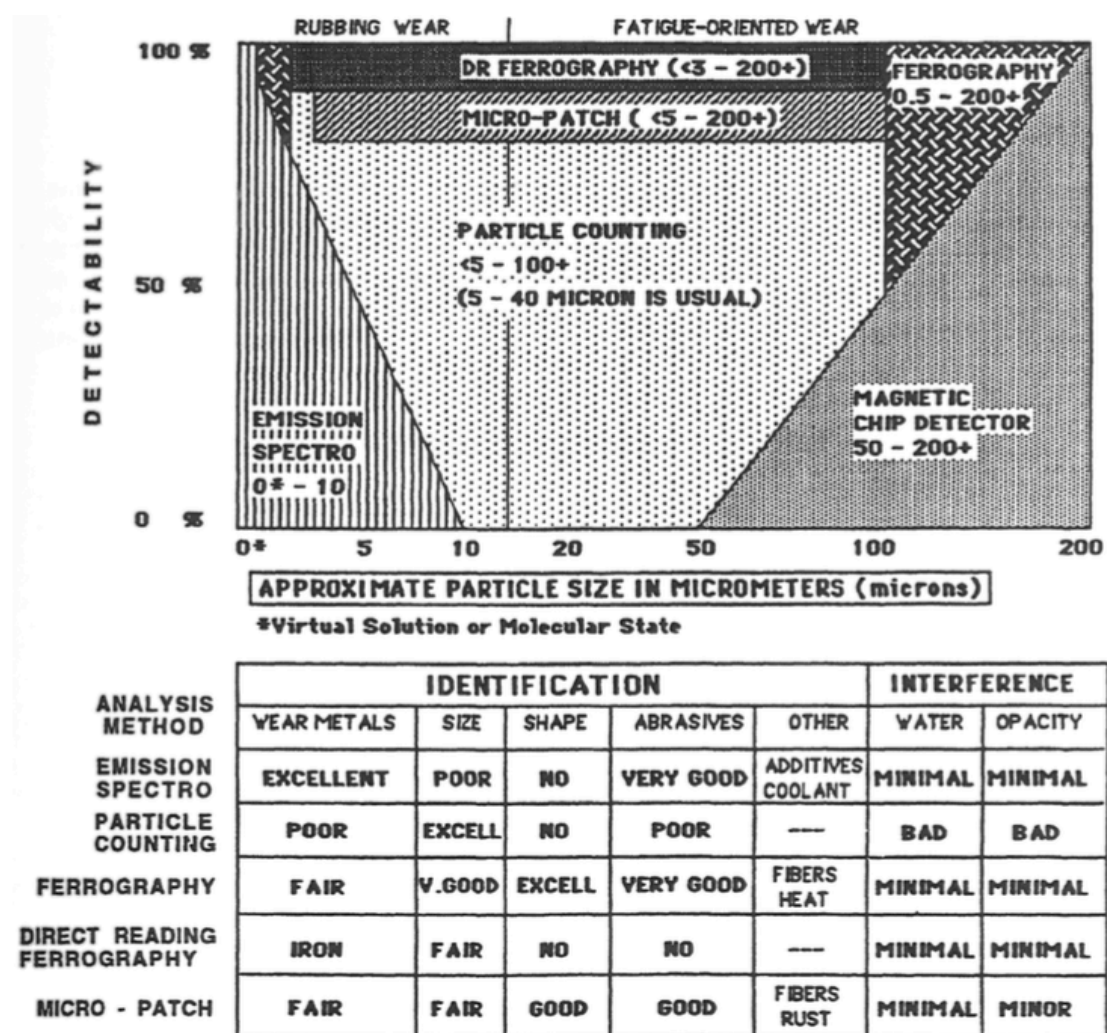


Figura 3.18 – Comparação entre os diferentes tipos de teste para a detecção de partículas presentes num lubrificante, adaptado de [26].

Através de uma análise ao lubrificante é possível prever-se o tempo de vida útil que ainda dispõe e prever avarias e falhas. Na Figura 3.19, está representada a alteração que determinados parâmetros do lubrificante sofrem ao longo da sua vida útil.

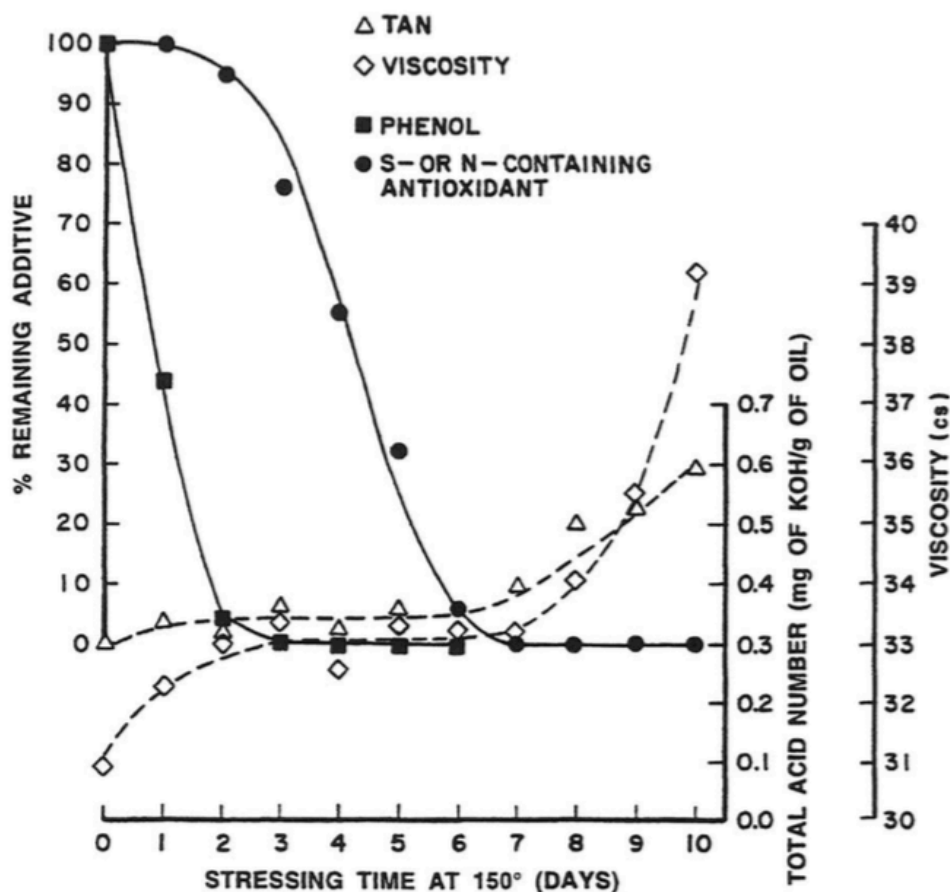


Figura 3.19 – Decaimento das propriedades do lubrificante ao longo do tempo de uso, adaptado de [26].

3.3.2. Termografia Infravermelha

Os raios infravermelhos foram descobertos em 1800 por Sir *William Herschel* quando este tentava descobrir quais as cores do espectro que eram responsáveis pelo aquecimento dos objetos. Para tal, *Herschel* colocou um termómetro de mercúrio no espectro obtido por um prisma de cristal e mediu a temperatura emitida por cada uma das cores e verificou que a temperatura aumentava quando se passava do violeta para o vermelho, verificou também que a temperatura era mais alta para lá do vermelho, na parte invisível do espectro. A radiação infravermelha apresenta comprimentos de onda entre os 700 nm e 1 mm, considerada uma radiação baixa na faixa de energia necessária para fazer os átomos de uma substância vibrarem sem provocar uma reação, sendo considerada uma radiação não ionizante.

Todos os objetos emitem radiação infravermelha, sendo que a intensidade da radiação emitida depende da temperatura do objeto e da capacidade de o objeto emitir radiação, conhecida por emissividade (ϵ). A emissividade é definida como a capacidade que o corpo dispõe para radiar energia quando comparada com a de um corpo negro perfeito. Um corpo negro perfeito é um corpo que absorve toda a radiação eletromagnética que nele incide,

considerando que tem uma emissividade $\varepsilon=1$. Todos os corpos a uma temperatura acima do zero absoluto $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0\text{ }^{\circ}\text{K}$) radiam calor, sendo que quanto mais quente estiver o corpo, maior a radiação e maior a radiação infravermelha.

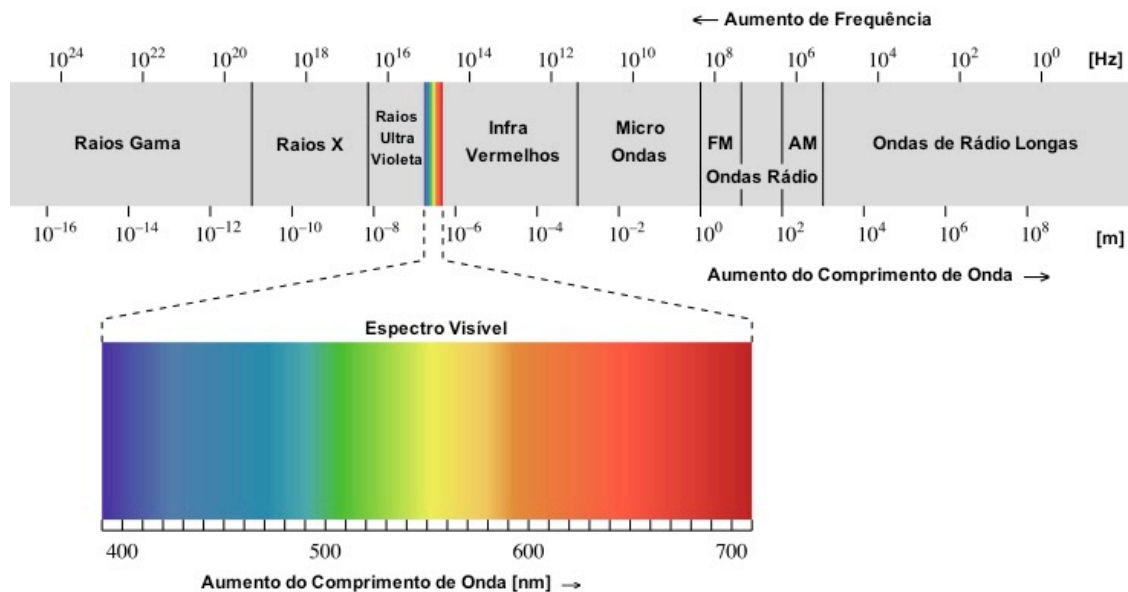


Figura 3.20 – Espectro eletromagnético e respectivos comprimentos de onda [52].

A termografia por infravermelhos (TI) consiste na captação de imagens de calor, chamados de termogramas, que não visíveis pelo olho humano, através de uma câmara termográfica. A temperatura é um dos indicadores mais comuns do estado dos equipamentos e componentes. Máquinas defeituosas, conexões elétricas corroídas, componentes danificados ou desequilibrados, rolamentos em fim de vida ou defeituosos entre outros podem gerar uma distribuição de temperaturas anormal.

A TI permite a deteção precoce de falhas dos equipamentos em condições de operação e de uma forma não invasiva, permitindo assim diminuir o tempo de paragem do equipamento, evitando falhas catastróficas e reduzindo o custo de manutenção. Nas últimas décadas esta tecnologia tem ganho uma grande importância na monitorização de condição de edifícios, instalações elétricas, maquinaria e equipamentos, deformações de materiais sob várias condições de carga e até no controlo de soldaduras. Devido à nova geração de câmaras de infravermelhos esta técnica tornou-se cada vez mais precisa, fiável e mais económica [30]. Na Figura 3.21 e Figura 3.22 pode ver-se uma falha na ignição num cilindro de um motor diesel e um rolamento em sobreaquecimento, respetivamente. A falha na ignição é detetada pois o canal do coletor de escape de um dos cilindros encontra-se a uma temperatura significativamente mais baixa que os restantes. Ou seja, no interior desse cilindro a temperatura é mais baixa que nos restantes concluindo-se assim que houve uma falha na ignição.

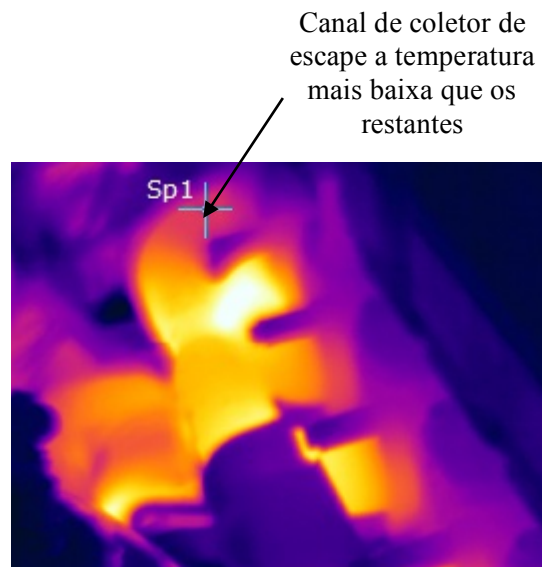


Figura 3.21 – Falha na ignição de um cilindro de um motor diesel [53].



Figura 3.22 – Rolamento em sobreaquecimento [53].

3.3.3. Pressão no Cilindro

A medição e a monitorização da pressão no cilindro são importantes, uma vez que permitem averiguar se a combustão está a ocorrer de forma adequada, promovendo a poupança de combustível e a redução de emissões. Por vezes, esta medição é utilizada para monitorizar o processo térmico, já que, através do momento de força produzido pela pressão do ar, é possível obter-se o contributo de cada cilindro. Pode ser realizada direta ou indiretamente.

- **Diretamente** – Medição através da colocação de transdutores no topo dos cilindros. Apesar de existem vários tipos de transdutores de pressão, o mais utilizado é o piezoelétrico Kistler. O processamento de sinal deste tipo de sensores é fácil e os dados fornecidos são exatos e fiáveis. Contudo, como é um

método demorado e invasivo, pois requer que sejam colocados sensores dentro do motor, esta não é uma prática muito rentável na monitorização de condição;

- **Indiretamente** – Os métodos mais recentes e eficientes de medição indireta da pressão do cilindro são as seguintes:
 - **Vibração** – A pressão no cilindro pode ser obtida através de sinais estruturais dados pela função de transferência ou pelo filtro Wiener-Hilbert ou transformada de Hilbert (Figura 3.23). Através da aplicação deste filtro ao sinal que é recebido da leitura das vibrações, torna-se possível anular as vibrações geradas pelo motor sem estar em carga e vibrações alheias ao funcionamento do motor;
 - **Variação da velocidade da cambota** – A variação da velocidade da cambota é útil para monitorizar as condições internas de um motor e, devido ao seu baixo custo e facilidade na medição, é um dos métodos mais utilizados para monitorizar motores e estimar a pressão nos cilindros. As variações na velocidade de rotação um motor são uma consequência direta da forma de onda do torque da cambota (Figura 3.24). Esta complexa forma de onda resulta de várias forças produzidas dentro de um motor em funcionamento, cuja componente fundamental reside na frequência de explosão e é atribuída a duas forças principais: força de pressão exercida pelo gás resultante da combustão e força de inércia gerada pelo pistão, bielas e outros elementos de ligação. No entanto, este método encontra-se limitado a motores pouco rotativos e que operam cargas elevadas.

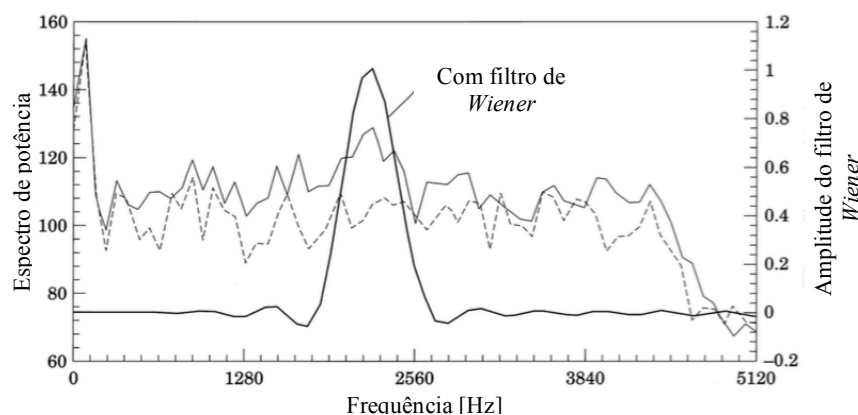


Figura 3.23 – Aplicação do filtro de *Wiener* ao sinal recebido, adaptado de [54].

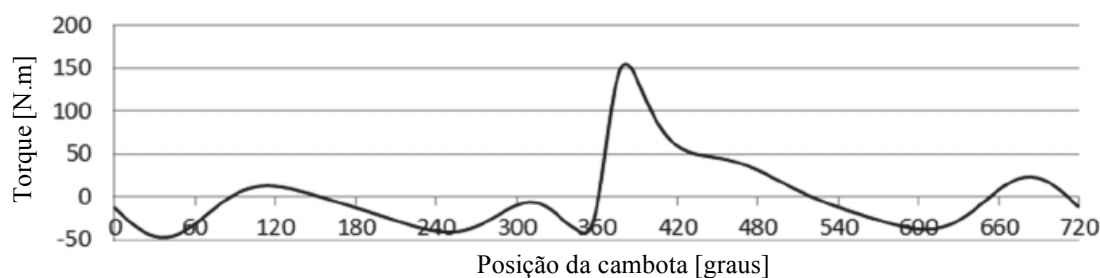


Figura 3.24 – Forma de onda do torque da cambota, resultante da ação do volante do motor, adaptado de [55].

3.3.4. Pressão, Temperatura e Consumo de Óleo

A pressão do óleo é medida diretamente através de um sensor de pressão e a sua temperatura pode ser obtida através da colocação de um termopar no interior do cárter e mergulhado no óleo. O consumo de óleo é um parâmetro bastante relevante para ser controlado. A sua análise é bastante simples sem recorrer a nenhuma técnica sofisticada, bastando a análise constante da vareta indicadora do nível de óleo do motor.

3.3.5. Pressão na Injeção de Combustível

Um dos métodos mais utilizados na medição da pressão de injeção de combustível é a ligação em série de um sensor de pressão com a rampa de injeção. Os resultados obtidos são bastante precisos, apesar de este método não representar a solução mais adequada para a monitorização de condição, já que pode conduzir a algumas falhas (fugas).

O método mais adequado passa pelo uso de sensores de pressão *clamp-on* (Figura 3.25), que recorrem a sensores piezoelétricos para captar a pressão. A técnica é baseada no conceito de expansão do canal de alimentação aquando da passagem do combustível a elevada pressão. Esta



Figura 3.25 – Sensor de pressão *clamp-on* [56].

passagem produz uma força que é transmitida ao piezoelétrico e resulta numa carga proporcional (pressão de combustível).

3.3.6. Temperatura do Pistão

Existem duas razões principais para ser controlada a temperatura que é atingida pelos segmentos do pistão e pela superfície do cárter do motor. Por um lado, deve-se ao facto da temperatura atingida pelos segmentos e pela camisa ser determinante na formação da camada de lubrificação. Por outro, a oxidação do óleo, e consequente acumulação de sedimentos, deve-se às elevadas temperaturas a que este está sujeito, nomeadamente pela parte superior dos segmentos.

A principal forma de medir a temperatura consiste na colocação de um termopar junto à camisa, sendo que será medida a sua temperatura e a do pistão, ao invés da temperatura dos segmentos. Além disso, como o tempo de resposta é elevado, não são analisadas as variações de temperatura. No entanto, não deixa de ser um método intrusivo, o que constituiu a maior desvantagem.

3.3.7. Análise de Vibrações

Nos dias de hoje e devido à tecnologia existente a análise de vibrações é um parâmetro de monitorização de condição bastante relevante. Através desta análise podem ser previstas algumas falhas no equipamento e detetados funcionamentos incorretos de alguns componentes. Para tal, recorre-se a equipamentos de medição de vibrações portáteis e de simples manuseio (Figura 3.26) para medir as vibrações do equipamento. Posteriormente essas medições deveram ser comparadas com os dados do fabricante ou com medições anteriormente efetuadas no mesmo equipamento. Quando o fabricante não fornece essa informação é importante então ter-se estabelecido um padrão de cada equipamento, ou seja, para cada regime funcional do seu equipamento quais serão os valores aceitáveis de vibração. Através deste tipo de monitorização podem ser previstas falhas como rolamentos deficientes, componentes desequilibrados, falhas na ignição, fornecimento inadequado de combustível e falhas no conjunto do cilindro/pistão



Figura 3.26 – FLUKE 805-
equipamento de medição de
vibrações [37].

o.

3.3.8. Outros parâmetros

Além dos parâmetros anteriormente enumerados, existem outros igualmente importantes e que também são monitorizados:

- Emissões de escape;
- Injeção de combustível;
- Fugas;
- Falha na ignição;
- Consumo de combustível;
- Temperatura dos gases de escape (*EGT*).

4. Proposta de Sistema de Monitorização

Neste capítulo é apresentado um estudo estatístico das avarias da frota da empresa sendo também apresentada uma proposta de um sistema de monitorização de condição a ser aplicado nessa mesma frota. É também explicado como será feita a inclusão deste tipo de monitorização no atual plano de manutenção.

4.1. Estatísticas de Avarias da Frota da Empresa

Segundo uma base de dados fornecida pela equipa de manutenção do Grupo VENDAP, entre 1994 e 2014 houveram 1600 intervenções nos equipamentos que compõem a frota da empresa, das quais 576 foram intervenções nos motores devido a falhas que ocorreram. Na Tabela 4.1 pode ser vista a percentagem de falhas que ocorreram distribuídos de acordo com o componente do motor que falhou e qual o tipo de falha que se registou.

Tabela 4.1 – Estatística das falhas ocorridas entre 1994 e 2014 nos motores que compõem a frota da empresa.

Componente	Tipo de Falha	Ocorrências	Percentagem de ocorrência
Bomba injetora		76	13,2
	Gripada	56	9,7
	Fugas	20	3,5
Radiador		71	12,3
	Fugas	64	11,1
	Entupido	7	1,2
Segmentos	Gastos/danificados	70	12,2
Junta da cabeça	Queimada	56	9,7
Injetores		52	9,0
	Gripados	38	6,6
	Fuga	14	2,4
Camisa	Gripada/danificada	39	6,8
Turbo		37	6,4
	Gripado	15	2,6
	Fuga	11	1,9
	Partido	6	1,0
	Folga	5	0,9
Pistão	Gripado/danificado	31	5,4
Correia distribuição	Partida	20	3,5
Bomba de água		18	3,1
	Fuga	9	1,6
	Gripada	7	1,2
Outros		18	3,1
Sistema de refrigeração (ventoinha)		16	2,8
Motor de arranque		14	2,4
Tubo água	Fuga	9	1,6
Arvore de cames		7	1,2
Retentor cambota		7	1,2
Válvulas		6	1,0
Tubo óleo	Fuga	6	1,0
Biela		5	0,9
Depósito líquido refrigeração	Fuga	5	0,9
Cabeça	Empenada	3	0,5
Cambota		3	0,5
Tubo gasóleo	Fuga	3	0,5
Bomba óleo		2	0,3
Bomba de óleo	Gripada	2	0,3
Intercooler		2	0,3
Total		576	100,0

Por forma a avaliar quais as falhas que poderiam ser detetadas através da implementação de um sistema de monitorização de condição, recorreu-se à metodologia dos 5 Porquês. Através desta metodologia pretende-se, partindo do principal sintoma de avaria, saber qual a sequência de falhas até chegar à causa raiz da avaria, encontrando, ao longo desta sequência, parâmetros que possam ser monitorizados, por forma a quebrar-se a sequência de falhas e impedir a avaria. A metodologia dos 5 Porquês será aplicada às falhas mais comuns e mais dispendiosas, que compreendem 80% das falhas dos motores, estando estas falhas relacionadas com:

- Bomba injetora
- Radiador
- Segmentos
- Junta da cabeça
- Injetores
- Camisa
- Turbo
- Pistão
- Correia distribuição
- Bomba de água.

Nos Apêndices A.1 a A.13 podem ser vistos os diagramas da metodologia dos 5 Porquês aplicados as avarias mais frequentes. Através desta metodologia, foi possível construir a tabela (Apêndice B) que representa, em função da avaria, quais os parâmetros relevantes de serem monitorizados para a deteção desta mesma avaria.

4.2. Equipamentos de Análise de Lubrificante

4.2.1. SKF TMEH 1

O SKF TMEH 1 (Figura 4.1) mede alterações na constante dielétrica de uma amostra de lubrificante. Ao comparar as medições obtidas através da análise de lubrificantes usados com as medições ao lubrificante novo, consegue estabelecer um grau de mudança na sua condição [31].

A alteração da constante dielétrica do lubrificante está diretamente relacionada com a degradação e contaminação do lubrificante. Este equipamento permite o rastreamento do desgaste mecânico e da perda de qualquer propriedade do lubrificante.

É um equipamento de fácil manuseio e leitura, conseguindo ainda armazenar a calibração do óleo novo na sua memória. Este equipamento permite analisar alterações na condição do lubrificante afetadas por parâmetros como:

- Conteúdo de água;
- Contaminação de combustível;
- Conteúdo metálico;
- Oxidação.

De notar que o *SKF TMEH 1* não é um aparelho analítico de medição, este aparelho tem como objetivo a comparação e análise das tendências de mudança do lubrificante.



Figura 4.1 – *SKF TMEH 1* [31].

Na Tabela 4.2 pode ser visto um resumo das especificações técnicas do aparelho *SKF TMEH 1*.

Tabela 4.2 – Especificações técnicas *SKF TMEH 1*, adaptado de [31].

Especificações Técnicas *SKF TMEH 1*

Tipos de óleo adequados	Óleos minerais e sintéticos
Repetibilidade	±5%
Output	Escala verde/vermelha + valor numérico
Bateria	Pilha 9V alcalina tipo IEC 6LR61
Duração da bateria	150 horas ou 3000 testes
Dimensões	250 x 95 x 32 mm

O aparelho *SKF TMEH 1* tem um custo de 1 669,00€ (1 999,00\$ USD).

4.2.2. *FluidScan® 1000 Series Spectro Scientific*

FluidScan® Q1000 (Figura 4.2) é um aparelho portátil de monitorização de condição que permite através da análise de um lubrificante determinar quando este deve ser mudado devido à contaminação ou degradação excessiva que pode apresentar. O *FluidScan®* recorre a uma inovadora patente para apresentar e analisar as amostras. Este equipamento recorre a espectroscopia por infravermelhos, uma técnica que ganhou uma grande aceitação como um teste para analisar a degradação e contaminação de lubrificantes. Através deste aparelho portátil é possível em qualquer local um operador fazer uma análise a um lubrificante com a precisão de uma análise de laboratório. Através desta rápida análise é possível ter acesso às propriedades críticas de um lubrificante permitindo ao utilizador aumentar intervalos entre mudanças de óleo, reduzir custos operacionais e evitar intervenções não programadas [32].

A *Spectro Scientific* salienta ainda algumas capacidades que o *FluidScan® Q 1000* proporciona que não são possíveis através da análise padrão por infravermelho como:

- Capacidade de medir TAN e TBN com uma correlação superior à tecnologia já existente;
- Aplicação de calibrações multivariadas que ajudam a obter leituras quantitativas mesmo com amostras complexas contaminadas;
- O uso do *software Spectra*, fornece uma correlação entre a amostra desconhecida com dados de diversos lubrificantes presentes na base de dados do *FluidScan*;
- A patenteada célula de *fliptop* permite resultados mais fiáveis e rápidos, eliminando também o enfeito de franja observados em células convencionais;
- A célula *FLIPTOP* permite também analisar massas lubrificantes, dispensando o uso de células de reflectância total atenuada (*ATR Cells*), com menor ruído, melhores limites de detetabilidade e melhor repetibilidade;
- O *software* de base de dados *FluidScan Monitoring Manager* integrado sincroniza o *FluidScan®* com um computador para arquivamento de resultados, estudo de tendências e relatórios de medições;
- Através da definição dos limites desejáveis dos parâmetros medidos, pode ser configurado um aviso prévio por forma a evitar problemas iminentes.

O *FluidScan*® permite analisar a condição e contaminação do lubrificante através da medição de um total de 13 parâmetros que são:

- Número total de acidez (*TAN-Total Acid Number*) medido em mgKOH/g de óleo;
- Número total de basicidade (*TBN-Total Base Number*) medido em mgKOH/g de óleo;
- Oxidação medido em $\text{AbS}^{10}/0.1 \text{ mm}$;
- Nitração medido em AbS/cm ;
- Sulfatação medido em $\text{AbS}/0.1 \text{ mm}$;
- Lubrificante incorreto;
- Depleção de aditivo anti desgaste medido em $\text{AbS}/0.1 \text{ mm}$;
- Fuligem medido em %;
- Glicol/anticongelante medido em % por peso;
- Água medido em ppm;
- FAME do diesel medido em %;
- Glicerina medido em % por peso.



Figura 4.2 – *FluidScan Q1000* [32].

¹⁰ abS – absiemens é a unidade de condutância utilizada no sistema CGS (1abS (absiemens) = 1×10^9 S (siemens))

Na tabela seguinte, (Tabela 4.3), podem ser observadas as especificações técnicas do *FluidScan Q1000*.

Tabela 4.3 – Especificações técnicas do *FluidScan® Q1000*, adaptado de [32].

Energia	Bateria de íões de lítio substituíveis
Dimensão	170 x 140 x 9 mm
Peso	1.4 Kg
Sistema Operativo	Windows CE
Ecrã	320 x 320 LCD a cores
Conexões	USB (para transferência de dados, suporta um teclado ou rato)
Memória	64 Mb RAM 64Mb Flash
Comandos	4 botões e um <i>joystick</i>
Armazenamento	5000 análises
Temperatura de Funcionamento	-10°C a 50°C
Humidade de Funcionamento	0 a 100%
Altitude de Funcionamento	5000 m
Duração da Bateria	6 a 8 horas

O aparelho *FluidScan Q1000* tem um custo de 15 862€ (19 000,00\$ USD).

4.2.3. *MicroLab Series Spectro Scientific*

O *MicroLab Series* da *Spectro Scientific* (Figura 4.3) é um aparelho de monitorização de condição de lubrificantes, totalmente automático e permite o diagnóstico de vários tipos de lubrificante. Este equipamento é frequentemente utilizado em indústrias que operam com frotas e maquinaria, pois pode ser facilmente operado por um elemento da manutenção dispensando a intervenção de um químico. A operação de análise e o processo de limpeza são realizados de forma automática e emitem relatórios fáceis de entender (Anexo A) com limites de alarme identificados por cor e diagnósticos especificados [33].

Na análise química tanto o *MicroLab 30* como o *MicroLab 40* (opções de aparelhos *MicroLab Series*) fornecem dados de degradação e contaminação do lubrificante. Como parâmetros de degradação fornece:

- Oxidação;
- Nitração;
- TBN.

Quanto a elementos de contaminação do lubrificante este equipamento fornece as medições de:

- Fuligem;
- Água;
- Glicol.



Figura 4.3 – *MicroLab Series Spectro Scientific* [33].

Na análise de viscosidade e através do *MicroLab Dual Temperature Viscometer (DTV)*, tecnologia usada pelo *MicroLab* para medições relacionadas com viscosidade do lubrificante, fornece análises cinemáticas de viscosidade que podem ajudar na identificação da potencial degradação do lubrificante. Tanto o *MicroLab 30* como o *MicroLab 40* permitem a medição de:

- Viscosidade cinemática a 40c e 100c;
- Índice de viscosidade (*VI- Viscosity Index*).

O *MicroLab Optical Emission Spectrometer* (tecnologia usada pelo *MicroLab* para análise de partículas) quantifica a presença de metais causada pelo desgaste de componentes mecânicos, bem como aditivos de óleo ou fontes de contaminação. Neste tipo de teste existem algumas diferenças entre o *MicroLab 30* como o *MicroLab 40*:

- O *MicroLab 40* analisa 20 elementos, incluindo desgaste, contaminação e aditivos;
- O *MicroLab 30* analisa 10 elementos (desgaste e contaminação) e é atualizável para incluir os 20 elementos.

O modelo *MicroLab 40* está equipado com um contador de partículas para medir a contaminação por partículas. Este modelo fornece:

- Contagem em bruto das partículas;
- Dimensões ISO das partículas.

A Figura 4.4 ilustra uma comparação entre as capacidades do *MicroLab 30* e o *MicroLab 40*.

		 MICROLAB 40	 MICROLAB 30
ANÁLISE ELEMENTAR 	Concentração elementar e identificação (metais de desgaste e contaminação)	✓	✓
	Níveis/depleção de aditivos	✓	
	Ferro de desgaste (partículas grandes)		
QUÍMICA 	Nitração	✓	✓
	Oxidação	✓	✓
	Glicol	✓	✓
	Água	✓	✓
	Fuligem	✓	✓
	TBN	✓	✓
CONTAGEM DE PARTÍCULAS 	Contagem de partículas e limpeza ISO	✓	
VISCOSIDADE 	Viscosidade (40c e 100c)	✓	✓
OUTROS	Diluição de combustível	✓	✓
	Líquido refrigerante		
	DEF		

Figura 4.4 – Comparação entre o *MicroLab 30* e o *MicroLab 40*, adaptado de [33].

A Tabela 4.4 apresenta os parâmetros que o *MicroLab* fornece e o Anexo A ilustra um exemplo do relatório que é emitido pelo equipamento

Tabela 4.4 – *Output* do *MicroLab 30* e *MicroLab 40*, adaptado de [33].

<i>Output</i> do Equipamento	
Análise Elementar (ppm)	Base de dados de metais simples- <i>MicroLab 30</i> e <i>40</i>: Alumínio, Crômio, Cobre, Ferro, Chumbo, Molibdênio, Potássio, Silício, Sódio e Estanho Base de dados de metais alargada – <i>MicroLab 30</i> (opcional) e <i>MicroLab 40</i>: Bário, Boro, Cálcio, Magnésio, Manganês, Níquel, Fósforo, Titânio, Vanádio e Zinco.
Análise Química	Fuligem (% por peso), Água (% por peso), Glicol (% por peso), Oxidação (abS/cm), Nitração (abS/cm), TBN (mgKOH/g)
Viscosidade	Viscosidade cinemática (até 680 cSt) a 40C e 100C
Contagem de Partículas (Exclusivo <i>MicroLab 40</i>)	Contagem Partículas > 4 µm (por mL) (7 classificações ISO para as dimensões das partículas)

O aparelho *MicroLab 30* e *MicroLab 40* tem um custo de 25 334,00€ (30 058,00 USD) e 29 923,00€ (35 500,00 USD) respetivamente.

4.2.4. Periodicidade de Análise de Lubrificantes

Após a escolha do equipamento para análise do lubrificante é importante definir qual a periodicidade com que essa análise deve ser realizada. Segundo a *NORIA Corp.*[34], empresa Norte Americana dedicada à análise de lubrificantes, essa periodicidade deve ser calculada em função do equipamento em questão e outros fatores que podem ser vistos em detalhe na seguinte figura (Figura 4.5).

Sample Frequency Generator

1. Select 'Best Fit' Default Frequency

Bearings	500 hrs	Gearing, Low Speed	1000 hrs
Chillers	500 hrs	Hydraulics, Aviation	150 hrs
Compressors	500 hrs	Hydraulics, Industrial	700 hrs
Differentials	300 hrs	Hydraulics, Mobile	250 hrs
Engine, Aviation Recip	50 hrs	Transmissions	300 hrs
Engine, Diesel	150 hrs	Turbines, Aviation	100 hrs
Final Drives	300 hrs	Turbines, Gas	500 hrs
Gearing, Aviation	150 hrs	Turbine, Steam	500 hrs
Gearing, High Speed Industrial	300 hrs		

Write Default Here
Default
Hrs

2. Score Application Adjustment Factors

Economic Penalty of Failure - Circle Factor

Very High	Normal							Low
0.1	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0

Consider downtime costs, repair costs and general business interruption penalty.

Fluid Environment Severity - Circle Factor

Very High	Normal							Low
0.1	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0

Consider pressures, load, temperature, speed, contaminants in oil and duty cycle.

Machine Age - Circle Factor

Infant	Middle Age							Old Age		
0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.1

Infant machines are those going through break-in and have operated for less than 1% of expected machine life.
Old age machines are those showing symptoms of distress.

Oil Age - Circle Factor

Infant	Middle Age							Old Age	
0.1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0	0.5	0.25	0.1

Infant oils are those that have just been changed and are less than 10% into expected life. Old age oils are showing trends that suggest additive depletion, the onset of oxidation or high levels of contamination.

Target Tightness - Circle Factor

Tight	Normal							Loose	
0.1	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	1.75	2.0	

Oil properties that trend extremely close to targets and limits are 'tight'. Oils that typically trend well within targets and limits are loose. For instance, an oil with a cleanliness target of 13/11 and trends around 13/11 is tight.

Place Lowest Circled Factor Here
Adjustment Factor

3. Sample Frequency = Default x Adjustment Factor

Sample Frequency
Hrs



Copyright NORIA Corp.

Figura 4.5 – Folha de cálculo de periodicidade de análise de lubrificante segundo *NORIA Corp.* [34]

Segundo o *CIMAC – The International Council On Combustion Engines* [35] e a *Spectro Scientific* [36] a análise realizada ao lubrificante deve ser realizada ao fim de 500 horas de funcionamento do equipamento. Na Figura 4.6, pode ser vista a periodicidade, expressa em horas e dias, que a *Spectro Scientific*, vendedora de equipamentos de análise de lubrificante, propõem em função do equipamento a analisar.

Equipment Type	Normal Use Sampling Frequency (Hours)	Normal Use Sampling Frequency (Calendar)	Occasional Use Sampling Frequency (Calendar)
Industrial and Marine			
Steam Turbines	500	Monthly	Quarterly
Hydro Turbines	500	Monthly	Quarterly
Gas Turbines	500	Monthly	Quarterly
Diesel Engines-Stationary	500	Monthly	Quarterly
Natural Gas Engines	500	Monthly	Quarterly
Air/Gas Compressors	500	Monthly	Quarterly
Refrigeration Compressors	500	Monthly	Quarterly
Gearboxes-Heavy Duty	500	Monthly	Quarterly
Gearboxes-Medium Duty		Quarterly	Semi-Annually
Gearboxes-Low Duty		Semi-Annually Annually	Annually
Motors-2500 hp and higher	500	Monthly	Quarterly
Motors-200 to 2500 hp		Quarterly	Semi-Annually
Hydraulics		Quarterly	Semi-Annually
Diesel Engines-On and Off Highway	150 hours/10,000 miles	Monthly	Quarterly

Equipment Type	Normal Use Sampling Frequency (Hours)	Normal Use Sampling Frequency (Miles)
Off-Highway/Mobile Equipment		
Gasoline Engines		5000 miles
Differentials	300 hours	20,000 miles
Final drives	300 hours	20,000 miles
Transmissions	300 hours	20,000 miles

Equipment Type	Normal Use Sampling Frequency (Hours)
Aviation	
Reciprocating Engines	50 hours
Gas Turbines	100 hours
Gearboxes	100 hours
Hydraulics	100 hours

Figura 4.6 – Periodicidade de análise de lubrificante segundo a *Spectro Scientific* [36].

No Anexo B, disponibilizada pelo *CIMAC – The International Council On Combustion Engines* [35], pode ser vista a periodicidade com que deve ser feito cada tipo de teste ao lubrificante em função do equipamento a analisar.

Segundo [34], [35] e [36] o intervalo adequado para a recolha de amostras de lubrificante para análise situa-se entre as 500 horas e a 1000 horas de funcionamento do equipamento.

Recomenda-se então um intervalo inicial de inspeção dos equipamentos de 500 horas, podendo este aumentar em função da experiência.

4.2.5. Consumíveis para análise de lubrificantes

Para a realização de análise de lubrificantes são necessários alguns consumíveis como:

- Copos descartáveis de recolha de amostras
- Pipetas descartáveis
- Produto de limpeza

Os copos descartáveis de recolha de amostras, semelhantes ao da Figura 4.10, são para quando um equipamento seja imobilizado para manutenção seja possível ao operador recolher uma pequena amostra do lubrificante que se encontrava dentro desta para posteriormente ser analisado. Este copo deve ser identificado com a data e a código/matricula do equipamento que foi recolhido.



Figura 4.7 – Copos para recolha de amostra de lubrificante [57].

As pipetas descartáveis acima descritas, permitem ao operador, aquando da análise ao lubrificante, poder retirar uma pequena porção de lubrificante do copo de recolha e depositar no aparelho de análise.



Figura 4.8 – Pipetas descartáveis[58].

Será também necessário um produto de limpeza para ser aplicado na zona de depósito de amostra do equipamento de análise de lubrificante. Existem vários produtos no mercado adequados a esta função. Apenas se requer que seja desengordurante e que não seja demasiado agressivo para o material que entra em contacto, como exemplo do fabricante do *SKF TMEH 1* é dado o spray de limpeza *LOCTITE SF 7070*.



Figura 4.9 – LOCTITE SF 7070

4.3. Equipamentos de Análise Termográfica

4.3.1. *Flir One/Flir One Pro*

A câmara *Flir One* e *Flir One Pro* (Figura 4.11) são câmaras térmicas que podem ser ligadas a dispositivos *iOS* ou *Android*. Estas câmaras são uma ótima solução na monitorização de condição e oferecem a possibilidade de detetar falhas invisíveis rapidamente. Estes equipamentos combinam um sensor térmico de alta resolução capaz de medir temperaturas até 400°C e gerar relatórios. A Figura 4.10 e Figura 4.12 estabelecem uma comparação entre as

câmaras *Flir One* e *Flir One Pro* quanto à imagem que captam e comparações técnicas, respetivamente. Pode ainda ser visto na Figura 4.13 as especificações técnicas da *Flir One*.

Idealmente a verificação termográfica do equipamento deve ser feita quando o este está a funcionar no mínimo a 40% da sua carga típica. Desta forma as medições serão mais corretas uma vez que está a ser replicada a sua condição normal de funcionamento.

Através de uma imagem térmica pode ser vista qual a parte do equipamento que está em sobreaquecimento e assim prevenir falhas precocemente. Para a análise de temperaturas deve-se construir um padrão comparativo que auxilie na avaliação de resultados posteriores. Consequentemente, devem seguir-se dois pontos importantes:

- Comparações de temperaturas entre equipamentos semelhantes a executarem funções semelhantes
- Comparação da temperatura de medida com as especificações do fabricante

Posteriormente e para a deteção de uma possível falha deverá ser feita regularmente uma comparação das temperaturas com anteriores medições recolhidas do mesmo equipamento

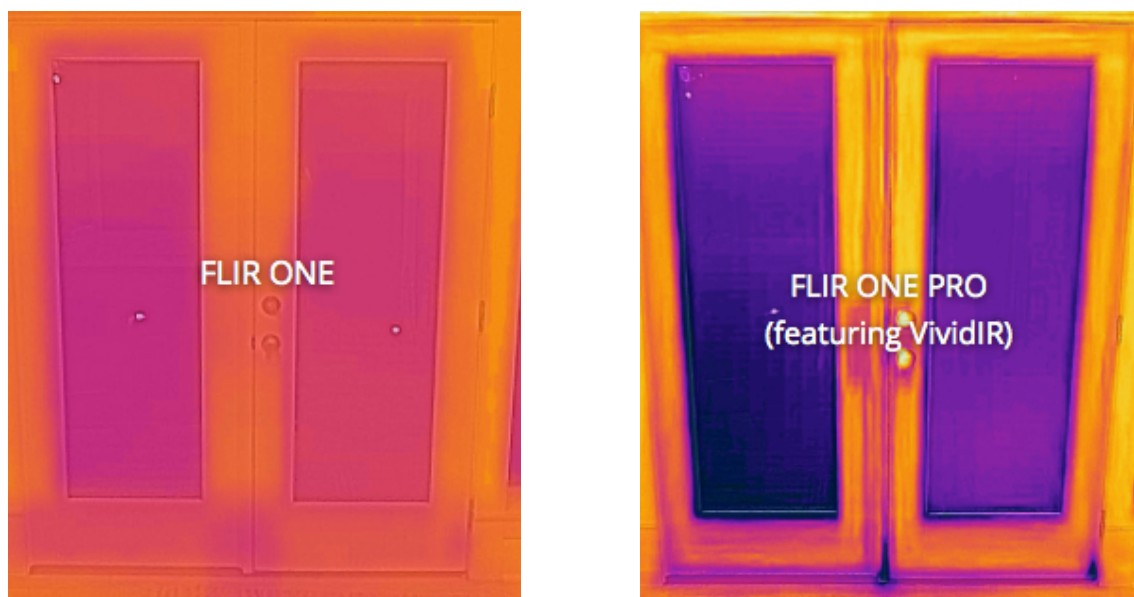


Figura 4.10 – Comparação entre as imagens de uma porta obtidas pela *Flir One* e *Flir One Pro* [59].

O aparelho *Flir One* tem um custo de 167,00€ (199,99\$ USD), já o *Flir One PRO* tem um custo de 334€ (399,99\$ USD).



Figura 4.11 – *Flir One* [59].

	FLIR ONE PRO	FLIR ONE
CAMERA FEATURES & MODES		
MSX	✓	✓
VividIR	✓	✗
Thermal Only	✓	✗
Visible Only	✓	✗
Video, Photo, Time-Lapse	✓	✓
Swipe To See Visible Image	✓	✓
MSX Distance (alignment)	✓	✓
Thermal Color Palettes	9	9
High / Low Gain Mode	✓	✗
IR Scale (Displayed on image, adjustable range)	✓	✗
Spot Meters (max.)	3 (movable)	1 (fixed)
Rectangular Region of Interest (max.)	3 (movable)	✗
Circular Region of Interest (max.)	3 (movable)	✗
Timer	✓	✓
Manual Flat Field Correction	✓	✓
Emissivity Settings	4	4

Figura 4.12 – Comparação entre as câmaras *Flir One* e *Flir One Pro* [59].

General		FLIR One Pro	
Certifications	MFi (iOS version), RoHS, CE/FCC, CEC-BC, EN61233		
Operating temperature	0 °C – 35 °C (32 °F to 95 °F) , battery charging 0 °C to 30 °C (32 °F to 86 °F)		
Non-operating temperature	-20 °C to 60 °C (-4 °F to 140 °F)		
Size	68mm W x34mm H x14mm D (2.7in x 1.3in x .6in)		
Weight	36.5g		
Mechanical shock	Drop from 1.8m (5.9ft)		
Video			
Thermal and visual cameras with MSX			
Thermal sensor	Pixel size 12µM, 8 – 14µM spectral range		
Thermal resolution	160x120		
Visual resolution	1440x1080		
HFOV / VFOV	55 ° ± 1 ° / 43 ° ± 1 °		
Frame rate	8.7Hz		
Focus	Fixed 15cm – Infinity		
Radiometry			
Scene dynamic range	-20 °C to 400 °C (-4 °F to 752 °F)		
Accuracy	±3 °C (5.4 °F) or ±5%, typical Percent of the difference between ambient and scene temperature. Applicable 60s after start-up when the unit is within 15 °C to 35 °C (59 °F to 95 °F) and the scene is within 5 °C to 120 °C (41 °F to 248 °F)		
Thermal sensitivity (MRTD)	150mK		
Emissivity settings	Matte: 95%, Semi-Matte: 80%, Semi-Glossy: 60%, Glossy: 30% Reflected background temperature is 22 °C (72 °F)		
Shutter	Automatic/Manual		
Power			
Battery life	Approximately 1h		
Battery charge time	40min		

Figura 4.13 – Especificações técnicas da *Flir One* [59].

4.4. Equipamentos de Análise de Vibrações

4.4.1. *Fluke 805*

O *Fluke 805* (Figura 4.14) é um fiável dispositivo de monitorização de vibrações para a deteção de avarias mecânicas que necessitam de leituras repetidas. Dispõe ainda de uma escala de classificação para o estado de rolamentos e vibrações.

As vantagens a salientar deste equipamento são:

- Fornece vários dados, tais como vibrações e temperaturas para uma análise mais completa;
- Ponta de medição que combina a vibração e a força exercida pelo utilizador por forma a garantir leituras mais precisas mesmo para diferentes forças e ângulos de medição aplicados pelo utilizador;
- Interface simples que apenas requer o regime de funcionamento RPM e o tipo de equipamento;
- Possibilidade de análise das medições em Excel através da exportação dos dados recolhidos;
- Medição de vibrações com frequências entre 10 a 1000 Hz e 4000 a 20000 Hz.



Figura 4.14 – *Fluke 805* [37].

A Figura 4.15 (na página seguinte) apresenta as especificações técnicas do aparelho.

Na medição e controlo de vibrações é importante que, para cada equipamento, seja estabelecido o padrão de vibrações. Este padrão pode ser fornecido pelo fabricante do equipamento, caso contrário deve ser criado. Para criar este padrão devem ser feitas para cada equipamento em boas condições de funcionamento, medições de vibrações para diferentes tipos de regime de funcionamento (RPM). Através deste padrão de vibrações do equipamento, é possível comparar medições posteriores, por forma a definir se houve ou não alterações nas vibrações do motor.

O aparelho *FLUKE 805* tem um custo de 1 668,00€ (1 999,00\$ USD).

Medidor de vibrações	
Intervalo de frequências baixas (medição geral)	10 Hz a 1000 Hz
Intervalo de frequências altas (medição CF+)	4000 Hz a 20 000 Hz
Níveis de gravidade	Bom, satisfatório, insatisfatório, inaceitável
Limite de vibração	Pico de 50 g (pico a pico de 100 g)
Conversor A/D	16 bits
Relação sinal/ruído	80 dB
Taxa de amostragem Baixa frequência Alta frequência	20 000 Hz 80 000 Hz
Cópia de segurança do relógio em tempo real	Pilha tipo botão
Sensor	
Sensibilidade	100 mV g \pm 10%
Gama de medição	0,01 g a 50 g
Intervalo de frequências baixas (medição geral)	10 Hz a 1000 Hz
Gama de alta frequência	4000 Hz a 20 000 Hz
Resolução	0,01 g
Precisão	A 100 Hz \pm 5% do valor medido
Unidades de amplitude	
Aceleração	g, m/sec ²
Velocidade	pol./seg., mm/seg.
Deslocamento	milhas, mm
Ambiente	
Temperatura de funcionamento	-20 °C a 50 °C (-4 °F a 122 °F)
Temperatura de armazenamento	-30 °C a 80 °C (-22 °F a 176 °F)
Humidade de funcionamento	10% a 95% (sem condensação)
Altitude de funcionamento/armazenamento	Nível do mar a 3048 metros (10 000 pés)
Classificação IP	IP54
Limite de vibração	Pico de 500g
Teste de queda	1 metro
Especificações gerais	
Tipo de bateria	AA (2) Dissulfeto de Ferro de lítio
Autonomia da bateria	Oito horas
Dimensões (C x L x A)	24,1 cm x 7,1 cm x 5,8 cm (9,5 pol. x 2,8 pol. x 2,3 pol.)
Peso	0,40 kg (0,89 lb)
Conectores	USB mini-B de 7 pinos, ficha de saída de áudio estéreo (adaptador de áudio de 3,5 mm), ficha do sensor externo (conector SMB)

Figura 4.15 – Características técnicas *Fluke 805* [37].

4.5. Análise Custo-Benefício

Como em qualquer área de negócio, quando queremos introduzir algo de novo, deve ser feita uma análise custo/benefício dessa alteração, bem como estabelecer o prazo em que se pretende ter o retorno do investimento para avaliar a sua viabilidade.

Neste caso de estudo, assumir-se-á que a alteração é viável caso a amortização do investimento ocorra ao final de 2 anos. Esta alteração, envolve a implementação de um sistema de monitorização de condição, que requer um levantamento de custos e benefícios ao ser aplicado. Para a averiguação de custos deve ter-se em conta dois tipos de custo:

- Custos não recorrentes – custos que a empresa terá na compra dos aparelhos de monitorização;
- Custos recorrentes – custos que a empresa terá com todos os consumíveis necessários para a monitorização de condição e o custo de mão-de-obra necessário.

Neste seguimento, serão feitas três propostas de sistemas de monitorização com diferentes custos não recorrentes.

Na **Proposta 1** é apresentado um aparelho de análise de lubrificantes, um de medição de vibrações e um de análise termográfica. O aparelho de análise de lubrificantes não é um medidor de características do lubrificante, mas sim um comparador. Este aparelho obtém uma escala de degradação do lubrificante a partir de contaminação por água, combustível, conteúdos metálicos e até pela oxidação do lubrificante através da análise de uma amostra de óleo novo e de outra de óleo usado. O principal defeito deste aparelho deve-se ao facto de apenas criar uma escala de degradação do lubrificante, não permitindo identificar quais as propriedades que se encontram degradadas. Através deste tipo de aparelho, o operador apenas sabe que o equipamento não se encontra conforme e que deverá parar. Posteriormente, e com base na experiência do operador, deverá ser feita uma análise ao equipamento para avaliar qual a avaria que apresenta.

A **Proposta 2** é semelhante à anteriormente referida diferindo apenas no aparelho de análise de óleo sugerido. Nesta proposta o aparelho de análise de lubrificantes é um aparelho de medição das suas propriedades permitindo medir os níveis de TAN, TBN, oxidação, nível de aditivo anti desgaste, fuligem, água, anticongelante, combustível entre outros. Este aparelho, ao contrário do anterior sugerido na **Proposta 1**, apresenta a vantagem de permitir ao operador identificar qual a propriedade do lubrificante que se encontra degradada. Além disso, dispõe de uma base de dados interna com informações de vários lubrificantes existentes no mercado e onde se pode também adicionar novos lubrificantes caso seja necessário. Esta funcionalidade do aparelho, facilita a medição dos parâmetros de análise do lubrificante e a comparação com os

valores padrão do lubrificante. No entanto, este aparelho não tem em conta a contaminação por partículas metálicas do lubrificante.

Através da **Proposta 2**, o operador terá ao seu dispor um aparelho que facilita na deteção da falha do equipamento, evitando assim despendar horas de mão de obra na análise do problema, face à Proposta 1.

Por fim, a **Proposta 3** destaca-se, em relação às restantes, através de um aparelho de análise de lubrificantes mais completo e que permite a análise de conteúdos metálicos. Trata-se do aparelho que avalia mais propriedades e com maior precisão, em comparação com os anteriormente apresentados. Todavia, tendo em conta o seu elevado custo e uma vez que a deteção das avarias mais frequentes da frota da empresa não depende de uma análise de partículas metálicas tão detalhada, esta Proposta torna-se, então, pouco viável sendo que não será considerada.

Em cada uma das propostas anteriores é também recomendado um aparelho de medição de vibrações e um de análise termográfica, sendo estes iguais em todas as propostas.

Os custos não recorrentes da **Proposta 1** são, então, o custo dos três aparelhos propostos:

- Aparelho de análise de lubrificantes *SKF TMEH 1* - 1 669,00€
- Aparelho de medição de vibrações *Fluke 805* – 1 669,00€
- Aparelho de análise termográfica *Flir One*– 169,00€

A **Proposta 1** apresenta um total de custos não recorrentes de 3 507,00€.

Quanto à **Proposta 2** os custos não recorrentes são:

- Aparelho de análise de lubrificantes *FluidScan Q1000* – 15 862,00€
- Aparelho de medição de vibrações *Fluke 805* – 1 669,00€
- Aparelho de análise termográfica *Flir One*– 169,00€

A **Proposta 2** apresenta um total de custos não recorrentes de 17 700,00€.

Para a **Proposta 3** os custos não recorrentes são:

- Aparelho de análise de lubrificantes *MicroLab 30* – 25 334,00€
- Aparelho de medição de vibrações *Fluke 805* – 1 669,00€
- Aparelho de análise termográfica *Flir One* – 169,00€

A **Proposta 3** apresenta um total de custos não recorrentes de 27 172,00€.

Em relação aos custos não recorrentes tem-se então o custo dos consumíveis e o custo da mão de obra despendida na monitorização de condição:

- Custo de copos descartáveis (60mL) de recolha de amostras – 68€/500 copos = 0,136€/copo
- Custo de pipeta descartável (6mL) para retirar óleo do copo de recolha e depositar no equipamento para análise – 4€/100 pipetas = 0,04€/pipeta
- Custo de spray de limpeza da célula de análise dos equipamentos LOCTITE 7070 – 9,75€/lata (400mL) dose de limpeza=5mL
- Custo de mão-de-obra despendida na monitorização de condição (15€/h)

Uma vez que a frota da empresa é composta por 444 equipamentos (entre camiões, gruas, geradores e compressores) e que cada análise deverá ser feita a cada 500 h (horas) de funcionamento, isto significa que em dois anos serão feitas 2585 análises ao lubrificante.

Na tabela seguinte (Tabela 4.5), pode ser visto mais detalhadamente como foi calculado o número de análises a realizar em dois anos. De salientar que, como os camiões apenas dispõem de quilómetros (km) realizados, foi assumido que um camião circula em média à velocidade de 60 km/h, por forma a calcular as horas de trabalho a que foi submetido.

Tabela 4.5 – Cálculo do número de análises ao lubrificante a realizar durante dois anos.

	Horas/dia	Horas/ano	Horas/2 anos	500 h	Frota	Análises/2 anos
Camiões	3,33	1216,67	2433,33	4,87	36	175,20
Gruas	3,50	1277,50	2555,00	5,11	38	194,18
Geradores e Compressores	4,10	1496,50	2993,00	5,99	370	2214,82
Total de análises a realizar em dois anos						2585

Para cada análise ao lubrificante será necessário um copo de recolha de amostra, uma pipeta e uma e duas doses de limpeza para a **Proposta 2** e **Proposta 1**, respetivamente.

Tabela 4.6 – Cálculo de custos recorrentes da Proposta 1.

Proposta 1					Total de custos recorrentes das 2585 análises
Custos recorrentes das 2585 análises a realizar em dois anos					
	Copo de recolha (1/análise)	Pipetas (1/análise)	Dose de limpeza 5mL (2 /análise)	Mão de obra (20 min/análise)	
Qtd.	6 x 500 copos	29 x 100 pipetas	65 x 400 mL	2585	14 082,75 €
Custo	408 €	116 €	633,75 €	12 925 €	

Tabela 4.7 – Cálculo de custos recorrentes da Proposta 2.

Proposta 2					Total de custos recorrentes das 2585 análises
Custos recorrentes das 2585 análises a realizar em dois anos					
	Copo de recolha (1/análise)	Pipetas (1/análise)	Dose de limpeza 5mL (1 /análise)	Mão de obra (10 min/análise)	
Qtd.	6 x 500 copos	29 x 100 pipetas	33 x 400 mL	2585	7 308,25 €
Custo	408 €	116 €	321,75 €	6 462,5 €	

Tabela 4.8 – Cálculo do total de custos da Proposta 1 e da Proposta 2.

Proposta 1		
Custos não recorrentes	Custos recorrentes	Total de custos
3 507,00 €	14 082,75 €	17 589,75 €
Proposta 2		
Custos não recorrentes	Custos recorrentes	Total de custos
17 700,00 €	7 308,25 €	25 008,25 €

Através da implementação de uma destas propostas de sistema de monitorização de controlo, a empresa poderá evitar avarias, bem como reduzir os custos de reparação associados.

Tal como anteriormente mencionado, este estudo incidiu apenas sobre as avarias com maior taxa de incidência e maiores custos associados, representando cerca de 80% do total das avarias ocorridas nos motores da frota da empresa.

Deste modo, tendo em conta o prazo de amortização do investimento de 2 anos, construiu-se a Tabela 4.9, que representa as ocorrências de cada tipo de avaria nesse período de tempo. Nesta tabela também se pode observar o custo do material, bem como as horas despendidas e o custo da mão de obra envolvidas na reparação de cada uma destas diferentes avarias.

Tabela 4.9 – Tabela representativa das falhas ocorridas durante dois anos e respetivos custo de reparação.

Componente	Tipo de falha	Ocorrências	Custo Material (€)	M.O (horas)	Custo M.O. (€)	Custo de reparação do total das ocorrências (€)
Bomba injetora	Gripada	5,6	2500	12	180	15008
	Fugas	2	1000	12	180	2360
Radiador	Fugas	6,4	1000	16	240	7936
	Entupido	0,7	200	16	240	308
Segmentos	Gastos/danificados	7	500	24	360	6020
Junta da cabeça	Queimada	5,6	200(ret) +200	12	180	3248
Injetores	Gripados	3,8	400/un.	12	180	2204
	Fuga	1,4	400/un.	12	180	812
Camisa	Gripada/danificada	3,9	1400	80	1200	10140
Turbo	Gripado	1,5	500	8	120	930
	Fuga	1,1	500	8	120	682
	Partido	0,6	1200	8	120	792
	Folga	0,5	500	8	120	310
Pistão	Gripado/danificado	3,1	80(seg/un) +1400(cami) +400(pis)	80	1200	9920
Correia distribuição	Partida	2	200	4	60	520
Bomba de água	Fuga	0,9	800	8	120	828
	Gripada	0,7	800	8	120	644
Total gasto em reparações durante 2 anos						62 662 €

Tendo em conta que se trata de um sistema pioneiro para a empresa e não estando os trabalhadores habituados ao manuseio destes aparelhos, é espectável que se suceda um período de adaptação associado a possíveis falhas na monitorização dos equipamentos. Como tal, foi aplicado um critério conservador quanto ao benefício na deteção das avarias. Deste modo, prevê-se que, através da introdução da **Proposta 1** ou da **Proposta 2**, sejam detetadas 40% das avarias descritas na tabela acima (Tabela 4.9), correspondendo assim a um benefício de 25 065,00€.

Para se fazer o balanço de custo-benefício é necessário ter-se o total dos custos recorrentes e não recorrentes durante dois anos, bem como o benefício gerado durante esse mesmo período de tempo. Na tabela seguinte (Tabela 4.10) o balanço é feito para a **Proposta 1** e para a **Proposta 2**.

Tabela 4.10 – Balanço custo-benefício da Proposta 1 e da Proposta 2.

Proposta 1		
Custos	Benefício	Balanço
17 589,75 €	25 065 €	+ 7 475 ,25 €
Proposta 2		
Custos	Benefício	Balanço
25 008,25 €	25 065 €	+ 56,75 €

Segundo a tabela acima representada, tanto a **Proposta 1** como a **Proposta 2** apresentam um balanço positivo ao serem aplicadas. A **Proposta 1** apresenta um balanço positivo de 7 475,25 € face aos 56,75 € da **Proposta 2**. Isto significa que a **Proposta 1** apresenta uma vantagem relativa à **Proposta 2** em 7 418,5 €.

Como foi dito anteriormente, na **Proposta 1**, quando é feita a análise do lubrificante apenas se sabe que alguma propriedade do mesmo pode estar afetada, não se sabendo qual. Para tal, posteriormente à análise, o operador terá de efetuar uma inspeção com o objetivo de detetar qual a falha existente. Associado a esta inspeção, encontra-se o custo da mão de obra, que atualmente na empresa é de 15€/hora. Uma vez que o balanço da **Proposta 1** é superior ao da **Proposta 2** em 7 418,5 €, e que este valor convertido em mão de obra representa 494,57 horas, significa que, se nos próximos dois anos as avarias mantiverem com o mesmo nível de ocorrência (576/ 2 anos), os operadores dispõem em média de 51 minutos para detetar qual a falha que existe no motor.

No entanto, 51 minutos não são suficientes para, na maior parte dos casos, o operador detetar ao certo qual a falha acabando este por despendar mais tempo nesta inspeção. O facto de se despendar mais tempo neste processo, faz com que a partir desse momento a **Proposta 1**

passa a não ser mais rentável face à **Proposta 2**. Dado os tempos de reparação apresentados anteriormente (Tabela 4.9 da pág. 86) para várias reparações, estima-se que os 51 minutos não sejam suficientes para detetar a falha existente, levando a que a **Proposta 2** seja uma escolha mais rentável face à **Proposta 1**.

5. Conclusões e Propostas Futuras

5.1. Conclusões

Através de uma pesquisa bibliográfica, foi possível entender quais as avarias mais frequentes nos motores diesel, bem como a influência das novas tecnologias no aparecimento de novas avarias. Esta pesquisa revelou também quais os possíveis parâmetros a serem monitorizados neste tipo de equipamentos para o controlo da sua condição.

Uma análise à base de dados da empresa com as intervenções que ocorreram entre 1994 e 2014, revelou quais as avarias mais frequentes na frota. Porém, este estudo incidiu em apenas 80% destas 576 avarias relacionadas com o motor, dado serem as mais frequentes e dispendiosas para a empresa. Com recurso à metodologia dos 5 P's (5 Porquês), foram seleccionados os parâmetros mais relevantes a serem monitorizados para a deteção das avarias da frota.

Um estudo realizado ao mercado de aparelhos de monitorização revelou cinco possíveis equipamentos a serem aplicados na frota da empresa: três de análise de lubrificante, um de análise de vibrações e outro de análise termográfica. Neste seguimento, foram elaborados três possíveis sistemas de monitorização de condição de motores diesel (**Proposta 1**, **Proposta 2** e **Proposta 3**) que pressupõem a análise dos lubrificantes, análise das vibrações, análise termográfica e a outros parâmetros, diferindo no tipo de aparelho de análise de lubrificante utilizado.

Tendo em conta um prazo de retorno do investimento de cerca de 2 anos, foi feita uma análise de custo-benefício destas propostas, excluindo a **Proposta 3**, por apresentar um custo demasiado elevado que, à partida, se torna inviável para a empresa. Desta análise resultou a Tabela 4.9 (pág. 86) que regista as ocorrências de cada avaria ocorrida (80% das avarias de motores da frota), durante um período de dois anos, bem como o custo do material, horas de mão de obra e valor associado a essa mão de obra despendida na reparação de cada avarias.

Tendo em conta que as **Propostas 1 e 2** seriam pioneiras na empresa e não estando os trabalhadores habituados ao manuseio destes aparelhos de monitorização, foi aplicado um critério conservador quanto ao benefício na deteção destas avarias. Prevê-se que, com recurso a estas propostas, sejam detetadas apenas 40% das avarias consideradas (80% das avarias de motores da frota), representando um benefício de 25 065,00 €.

Foi então calculado que a **Proposta 1** apresentaria um balanço positivo de 7 475,25 € e a **Proposta 2** de 56,75 €, o equivale a uma diferença de 7 418,5€.

A **Proposta 2** é mais precisa que a **Proposta 1** na deteção de avarias, uma vez que a segunda requer uma inspeção ao equipamento para determinar a avaria em causa. Concluiu-se então, que essa inspeção não deveria ser superior a 51 minutos, pois sempre que for despendido mais que esse tempo, a **Proposta 2** torna-se mais viável do que a **Proposta 1**.

Tendo em conta o tempo despendido em reparações neste tipo de equipamentos, os 51 minutos tornam-se insuficientes para, na maior parte dos casos, os operadores detetarem a falha do equipamento. Posto isto, a **Proposta 2**, apesar de apresentar custos não recorrentes mais elevados face à **Proposta 1**, torna-se a proposta mais viável e que deverá ser aplicada na frota da empresa.

5.2. Propostas Futuras

Na monitorização de condição, uma das situações mais críticas é o *timing* que decorre entre a recolha dos parâmetros de monitorização e a ação a ser tomada para impedir a falha.

Atualmente, na empresa, é preenchida semanalmente uma folha com uma *check list* de cada equipamento que compõe a sua frota. Depois de preenchida pelo operador do equipamento, os dados presentes na folha são introduzidos numa base de dados e posteriormente analisados. A inserção destes dados é feita manualmente, tornando assim o processo demoroso, entrando algumas destas folhas com um mês de atraso.

Deste modo, é proposto, para trabalhos futuros, a implementação de um *software OMR* (*Optical Mark Recognition* – Reconhecimento ótico de caracteres). Este tipo de software, disponível em alguns casos de forma gratuita (*FormRead, ABBYY FineReader Verificare*), permite a leitura automática de uma folha através de um *scan* desta. Para tal, é usada uma folha, semelhante às muitas vezes usadas em inquéritos, que é preenchida através de pintar quadradinhos. A folha semanal utilizada na empresa seria substituída por uma deste tipo, facilitando assim o trabalho destes dados serem introduzidos manualmente na base de dados e reduzindo bastante o *timing* com que possa ser tomada qualquer ação. Na Figura 5.1 encontra-se ilustrado um exemplo de uma folha a ser preenchida e lida por um *softwre OMR*.

FormRead

Fill Your ID Below

<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

NAME _____
CLASS _____
SUBJECT _____

1. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...	2. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...
3. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...	4. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...
5. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...	6. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...
7. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...	8. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...
9. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...	10. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...
11. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...	12. Write your question... Ⓐ Write your option... Ⓑ Write your option... Ⓒ Write your option... Ⓓ Write your option...

Figura 5.1 – Template do software OMR FormeRead

Outra proposta seria a utilização da tecnologia de *QR CODE*, cuja folha semanal de cada equipamento deveria ser preenchida num software, disponível no mercado, que no final emitisse um *QR CODE*. Posteriormente, apenas deveria ser feito um *scan* do mesmo, permitindo o acesso à informação disponível no computador/base de dados, dispensado a transcrição manual da folha semanal.

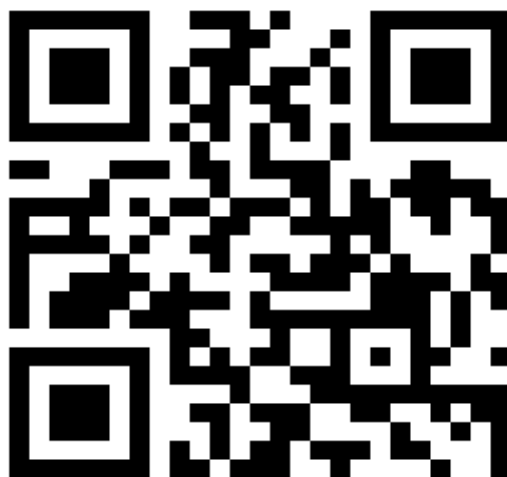


Figura 5.2 – *QR CODE* com indicação para o site do Grupo VENDAP

Bibliografia

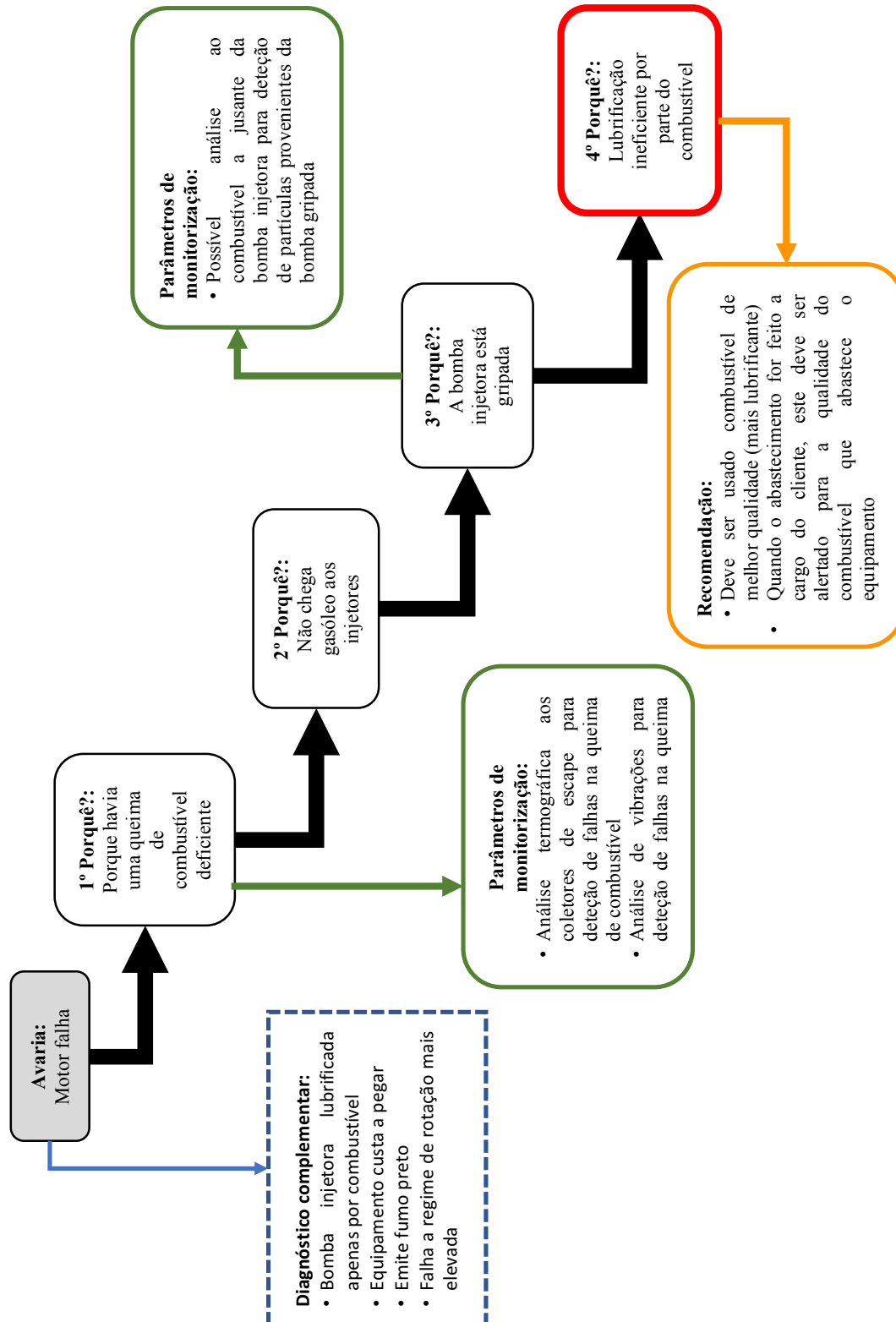
- [1] I. Alsayouf, «The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability», *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 105, pp. 70–78, 2007.
- [2] J. Veldman e H. Wortmann, «Typology of condition based maintenance», *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 17, n. 2, pp. 183–202, 2011.
- [3] K. B. Binder, K. Mollenhauer, e H. Tschöke, *Handbook of Diesel Engines*. Springer, 2010.
- [4] E. Sendzikiene, V. Makareviciene, e P. Janulis, «Influence of fuel oxygen content on diesel engine exhaust emissions», *Renew. Energy*, vol. 31, n. 15, pp. 2505–2512, 2006.
- [5] «DieselNet- European Emissions Standards». [Em linha]. Disponível em: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php#intro>. [Acedido: 07-Abr-2017].
- [6] G. E. Totten, S. R. Westbrook, e R. J. Shah, *Fuels and Lubricants Handbook: technology, properties, performance and testing*. ASTM International, 2003.
- [7] A. Sequeira Jr., «Lubricant Base Oil and Wax Processing», *Tribology International*, vol. 28, n. 8, pp. 574–575, 1995.
- [8] B. Bhushan, *Modern Tribology Handbook Vol. I*. CRC Press, 2001.
- [9] K. Bui, «A Defining Moment for Synthetics - Part 2», *Lubr. World*, vol. 9, 2000.
- [10] APETRO- Associação Portuguesa de Empresas Petrolíferas, «Lubrificantes», 2012.
- [11] D. Margaroni, «Fuel lubricity», *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 50, n. 3, pp. 108–118, 1998.
- [12] «U.S. Energy Information Administration (EIA)». [Em linha]. Disponível em: <https://www.eia.gov/beta/international/index.cfm?topL=exp>. [Acedido: 14-Set-2017].
- [13] Parlamento Europeu, *Diretiva (UE) 2016/802*. 2016.
- [14] *Decreto-Lei n.º 281/2000 de 10 de Novembro do Ministério da Economia*. 2000, pp. 7–13.
- [15] European Standard, *EN 590*. 2009.
- [16] N. B. Jones e Y.-H. Li, «A Review of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Diesel Engines», *Tribotest J.*, vol. 6, n. 3, pp. 267–291, 2000.
- [17] A. J. von Wielligh, N. D. L. Burger, e T. L. Wilcocks, «Diesel engine failures due to combustion disturbances, caused by fuel with insufficient lubricity», *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 55, n. 2–3, pp. 65–75, 2003.
- [18] R. Elo e S. Jacobson, «Formation and breakdown of oil residue tribofilms protecting the valves of diesel engines», *Wear*, vol. 330–331, pp. 193–198, 2015.
- [19] Y. S. Wang, S. Narasimhan, J. M. Larson, J. E. Larson, e G. C. Barber, «The effect of operating conditions on heavy duty engine valve seat wear», *Wear*, vol. 201, n. 1–2, pp. 15–25, 1996.
- [20] K. J. Chun, J. H. Kim, e J. S. Hong, «A study of exhaust valve and seat insert wear depending on cycle numbers», *Wear*, vol. 263, n. 7–12 SPEC. ISS., pp. 1147–1157, 2007.
- [21] W. L. Kent e F. T. Finnigan, «The Effect of Some Fuel and Operating Parameters on Exhaust Valve Seat Wear», *SAE Tech. Pap. 710673*, 1971.
- [22] P. Forsberg, F. Gustavsson, P. Hollman, e S. Jacobson, «Comparison and analysis of protective tribofilms found on heavy duty exhaust valves from field service and made in a test rig», *Wear*, vol. 302, n. 1–2, pp. 1351–1359, 2013.
- [23] P. Forsberg, R. Elo, e S. Jacobson, «The importance of oil and particle flow for exhaust valve wear - An experimental study», *Tribol. Int.*, vol. 69, pp. 176–183, 2014.
- [24] A. Vencel e A. Rac, «Diesel engine crankshaft journal bearings failures: Case study», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 44, pp. 217–228, 2014.
- [25] R. A. Collacott, *Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring*. Chapman and Hall, 1982.

- [26] E. R. Booser, *CRC Handbook of Lubrication and Tribology Vol. III Monitoring, Materials, Synthetic Lubricants and Applications*. CRC Press, 1994.
- [27] J. A. Addison e W. M. Needelman, «Diesel Engine Lubricant Contamination and Wear», *SAE Tech. Pap.* 881827, 1988.
- [28] J. Levitt, *Preventive and Predictive Maintenance*, Second Edi. Industrial Press, Inc., 2011.
- [29] M. H. Jones, «Ferrography Applied to Diesel Engine Oil Analysis», *Wear*, vol. 56, pp. 93–103, 1979.
- [30] S. Bagavathiappan, B. B. Lahiri, T. Saravanan, J. Philip, e T. Jayakumar, «Infrared thermography for condition monitoring - A review», *Infrared Phys. Technol.*, vol. 60, pp. 35–55, 2013.
- [31] SKF, «SKF TMEH 1 Technical Data». 2016.
- [32] Spectro Scientific, «Spectro FluidScan® Q 1000 Technical Data». 2016.
- [33] Spectro Scientific, «MicroLab Technical Data». 2017.
- [34] «NORIA Corporation». [Em linha]. Disponível em: <http://www.noria.com>. [Acedido: 22-Ago-2017].
- [35] The International Council on Combustion Engines, «Guidelines for the Lubrication of Medium Speed Diesel Engines», n. 29. 2008.
- [36] Spectro Scientific, *Oil Analysis Handbook*. 2016.
- [37] «Fluke 805». [Em linha]. Disponível em: <http://media.fluke.com/images/805-01a-600x402.jpg>. [Acedido: 30-Ago-2017].
- [38] J. Oskam, «Optimizing diesel engine condition monitoring», Delft University of Technology, 2014.
- [39] «Grupo VENDAP». [Em linha]. Disponível em: <http://www.grupovendap.com/>. [Acedido: 07-Fev-2017].
- [40] «Diesel Cycle P-V Diagram». [Em linha]. Disponível em: http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/propulsion/notes/fig5DieselIdeal_web.jpg. [Acedido: 12-Mar-2017].
- [41] «Otto Cycle P-V». [Em linha]. Disponível em: http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Termodinamica/3_5_1_CicloIdealOtto.gif. [Acedido: 13-Set-2017].
- [42] «Diesel Cycle T-S Diagram». [Em linha]. Disponível em: [http://4.bp.blogspot.com/-cjN7bY129Ho/VJVepQbcpOI/AAAAAAAAAPz4/N0GPsbV16K4/s1600/\(p-v\)-and-\(t-s\)-diagram-of-diesel-cycle.png](http://4.bp.blogspot.com/-cjN7bY129Ho/VJVepQbcpOI/AAAAAAAAAPz4/N0GPsbV16K4/s1600/(p-v)-and-(t-s)-diagram-of-diesel-cycle.png). [Acedido: 12-Mar-2017].
- [43] «Otto Cycle T-S». [Em linha]. Disponível em: <http://www.zoombd24.com/wp-content/uploads/2015/04/ottocycle1.png>. [Acedido: 13-Set-2017].
- [44] «Motor Diesel e Gasolina». [Em linha]. Disponível em: <http://www.areatecnologia.com/mecanismos/partes-motor-combustion.jpg>. [Acedido: 10-Fev-2017].
- [45] «Common Rail System». [Em linha]. Disponível em: <https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-5268949bfaacacf3ef45c179d29f2fbc-c>. [Acedido: 13-Set-2017].
- [46] «EGR System». [Em linha]. Disponível em: <https://www.dieselnets.com/tech/images/engine/egr/conf-hybrid2.png>. [Acedido: 13-Set-2017].
- [47] «Catalisador Diesel». [Em linha]. Disponível em: <http://cdn.portalsaofrancisco.com.br/wp-content/uploads/2016/07/catalisador-07.jpg>. [Acedido: 13-Set-2017].
- [48] «Catalytic converter interior». [Em linha]. Disponível em: http://blog.edgeautosport.com/hubfs/Tech_Blogs/Catalytic_Converters_and_Modifying_Making_Sense_of_It_All/Catalytic_Converter_Inside.jpg. [Acedido: 13-Set-2017].
- [49] «Interior do filtro de partículas». [Em linha]. Disponível em: http://www.filtroparticulas.com/?page_id=25. [Acedido: 14-Set-2017].
- [50] ABS (American Bureau of Shipping), «Equipment Condition Monitoring Techniques». 2016.

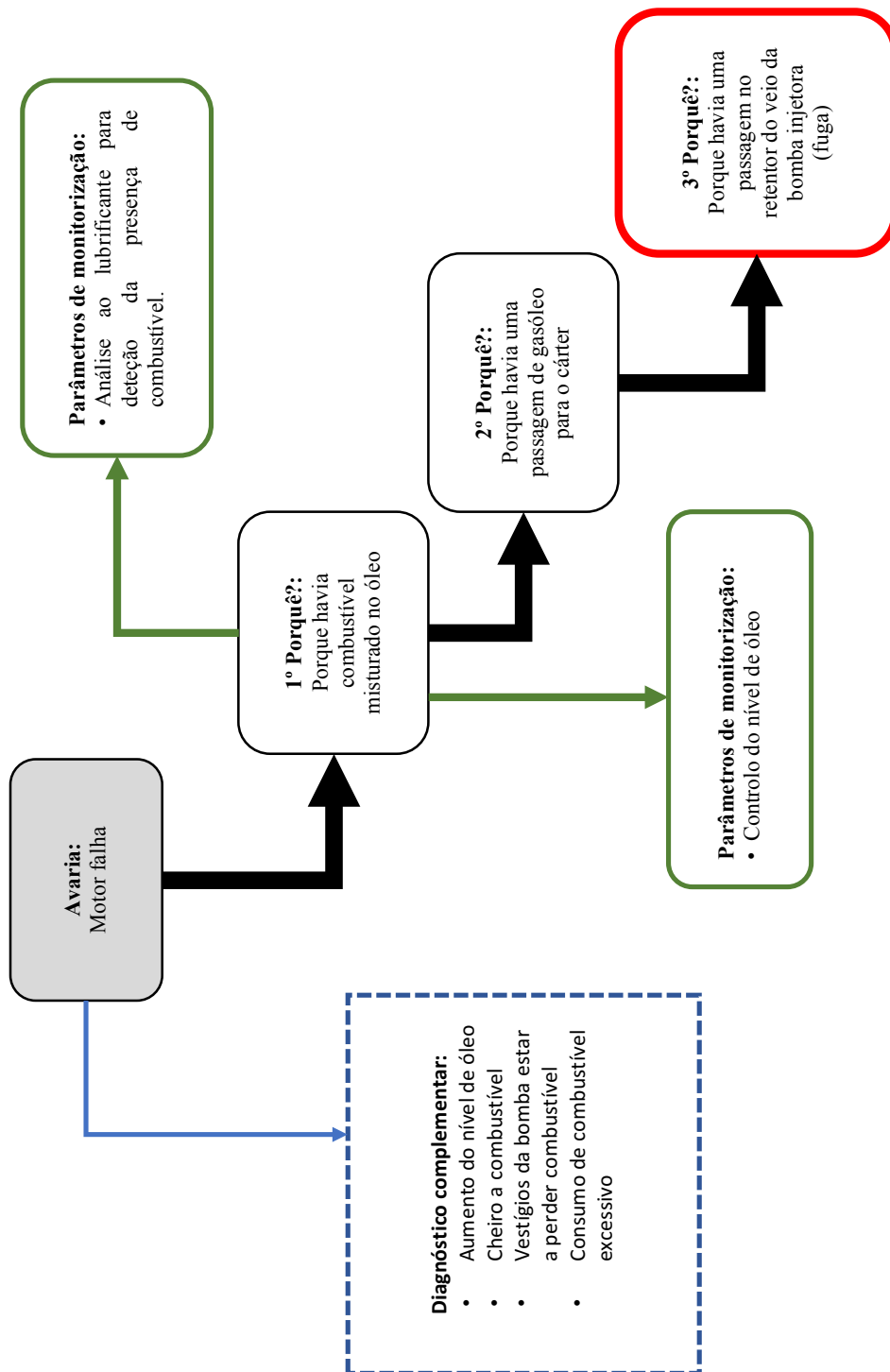
- [51] «Bosh Common Rail Injector». [Em linha]. Disponível em: [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM256/Sistemas Diesel com Gerenciamento Eletronico/Injetor do sistema Common Rail.jpg](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM256/Sistemas_Diesel_com_Gerenciamento_Eletronico/Injetor_do_sistema_Common_Rail.jpg). [Acedido: 05-Mai-2017].
- [52] «Espectro Eletromagnético». [Em linha]. Disponível em: https://static.todamateria.com.br/upload/es/pe/espectro_visivel.jpg. [Acedido: 30-Ago-2017].
- [53] «Thermal Images». [Em linha]. Disponível em: http://thermalimages.ca/?page_id=147. [Acedido: 30-Ago-2017].
- [54] P. Azzoni e M. Marseguerra, «Assessment of the potential of a Wiener-Hilbert filter for automatic diagnosis of spark ignition engine faults», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 9, n. 2, pp. 119–128, 1995.
- [55] P. Horváth e J. Égert, «Stress Analysis and Weight Reduction of a One-Cylinder Engine Crankshaft», *Acta Tech. Jaurinensis*, vol. 8, n. 3, p. 201, 2015.
- [56] ACA Tmetrix, «Clamp-on Sensor». [Em linha]. Disponível em: <http://tmetrix.com/product/clamp-on-sensor-9272-10/>. [Acedido: 07-Fev-2017].
- [57] Medical Express, «Copos para recolha de amostras». [Em linha]. Disponível em: <http://www.medicalexpress.net/copos-para-recolha-de-urina.html>. [Acedido: 22-Jan-2017].
- [58] Thomas Scientific, «Pipetas descartáveis». [Em linha]. Disponível em: [https://www.thomassci.com/Laboratory-Supplies/Transfer-Pipets/_/Disposable-Pipettes?q=Disposable Pipettes](https://www.thomassci.com/Laboratory-Supplies/Transfer-Pipets/_/Disposable-Pipettes?q=Disposable+Pipettes). [Acedido: 22-Nov-2017].
- [59] «Flir One». [Em linha]. Disponível em: <http://www.flir.eu/flirone/>. [Acedido: 30-Ago-2017].

Apêndices

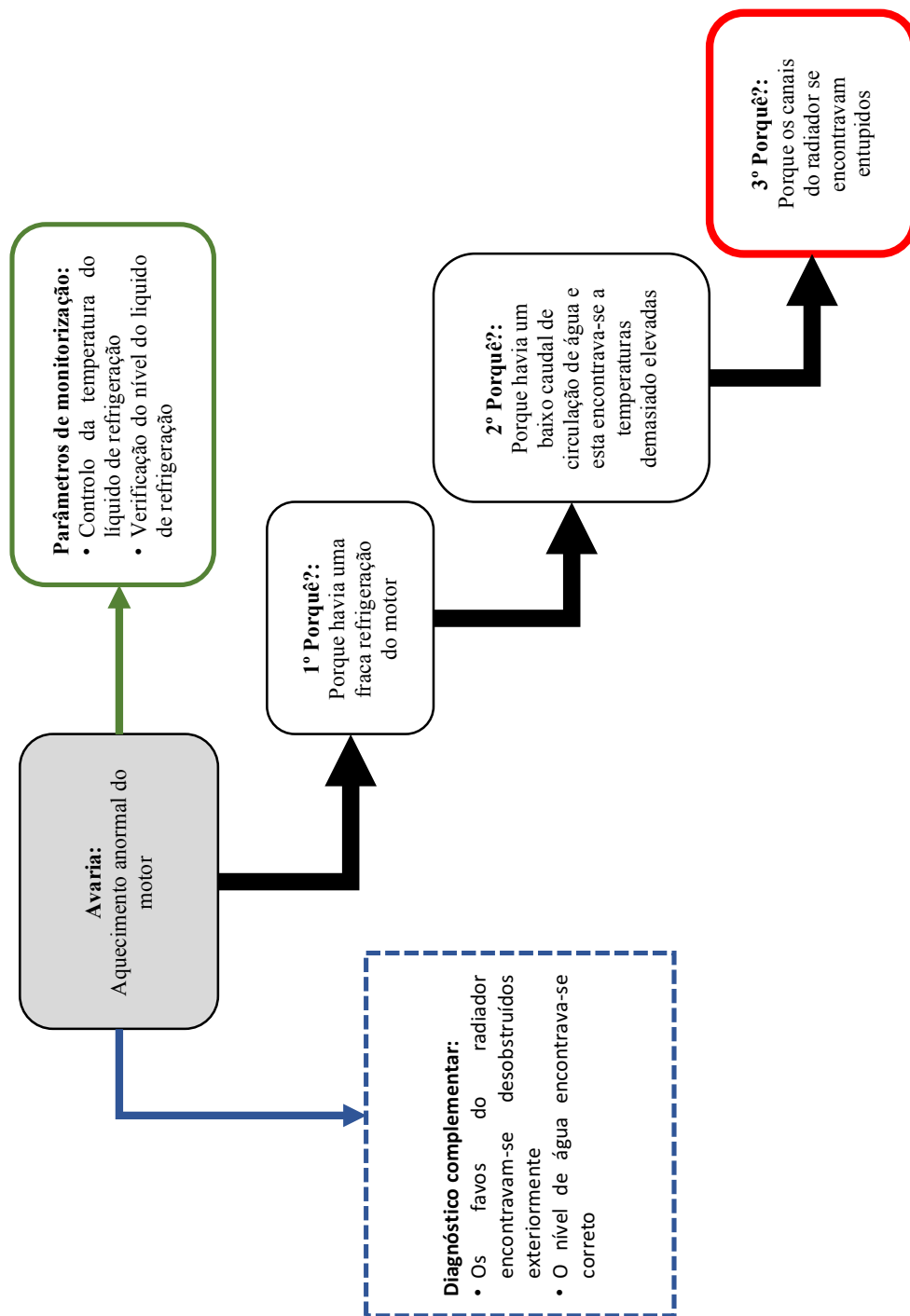
Apêndice A – Diagrama 5 Porquês das avarias



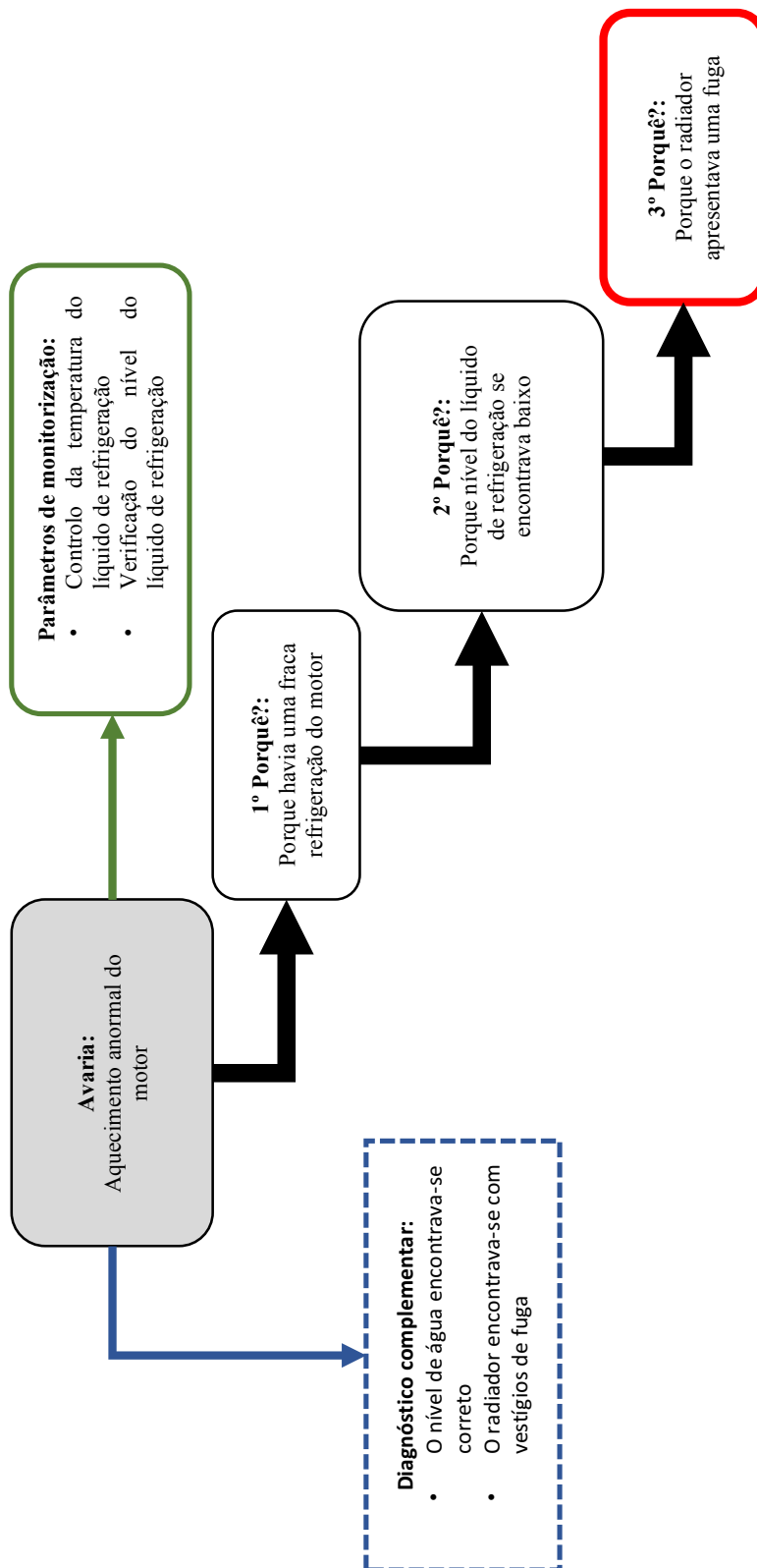
Apêndice A.1 – Método de 5 P's aplicado a uma bomba injetora gripada.



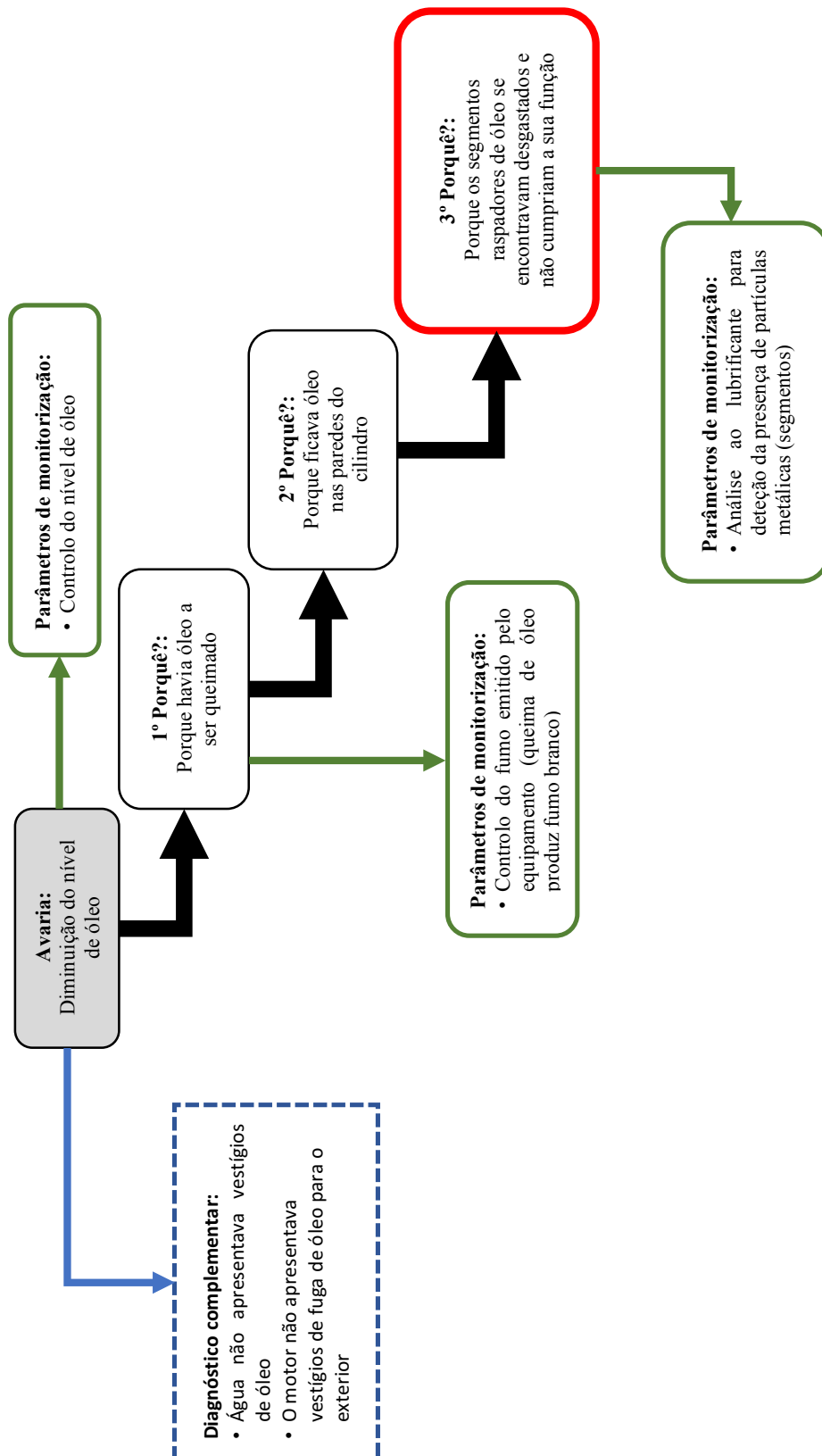
Apêndice A.2 – Método de 5 P's aplicado a uma fuga na bomba injetora.



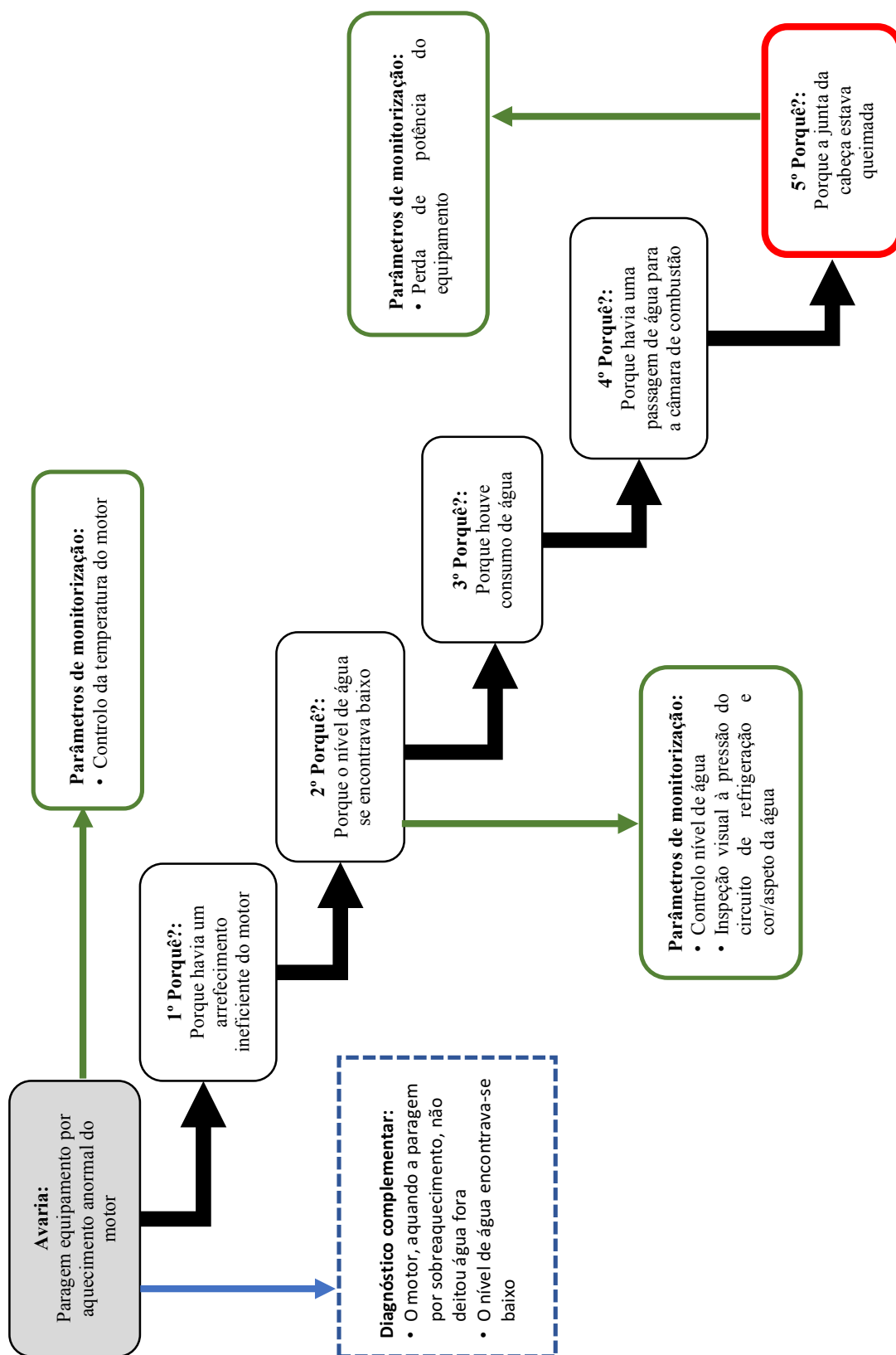
Apêndice A.3 – Método de 5 P's aplicado a um radiador entupido.



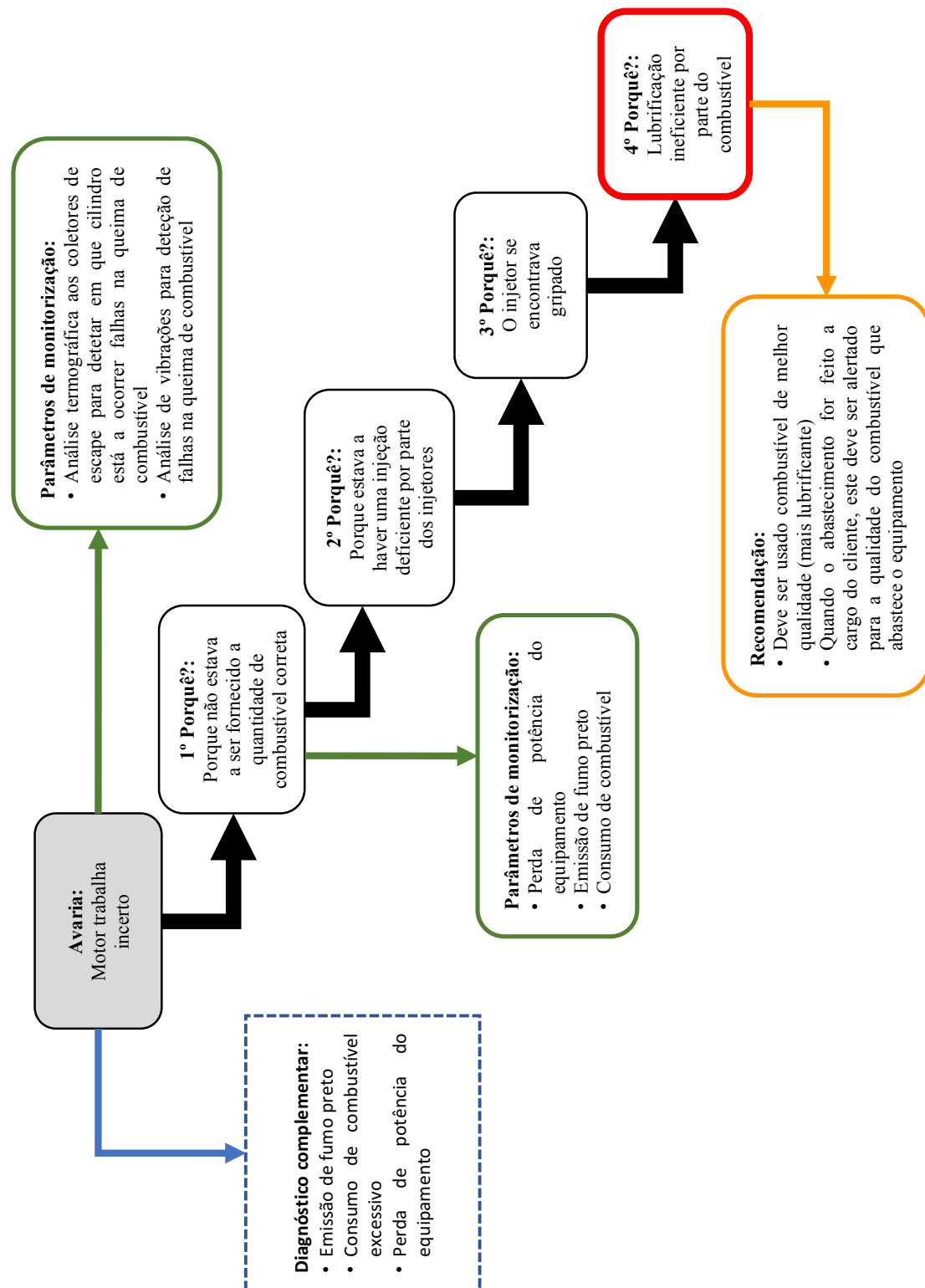
Apêndice A.4 – Método de 5 P's aplicado a uma fuga no radiador.



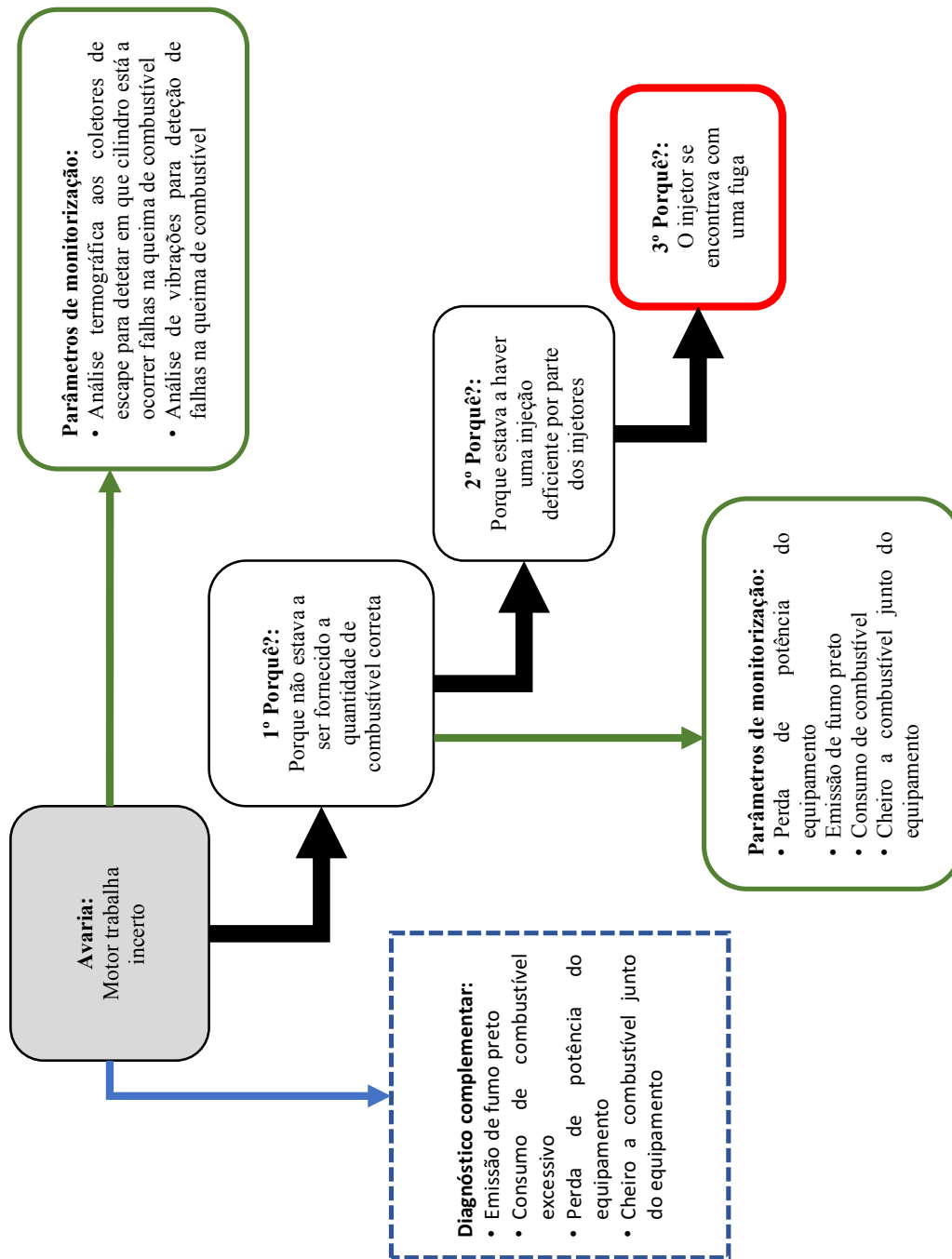
Apêndice A.5 – Método de 5 P's aplicado a falhas nos segmentos.



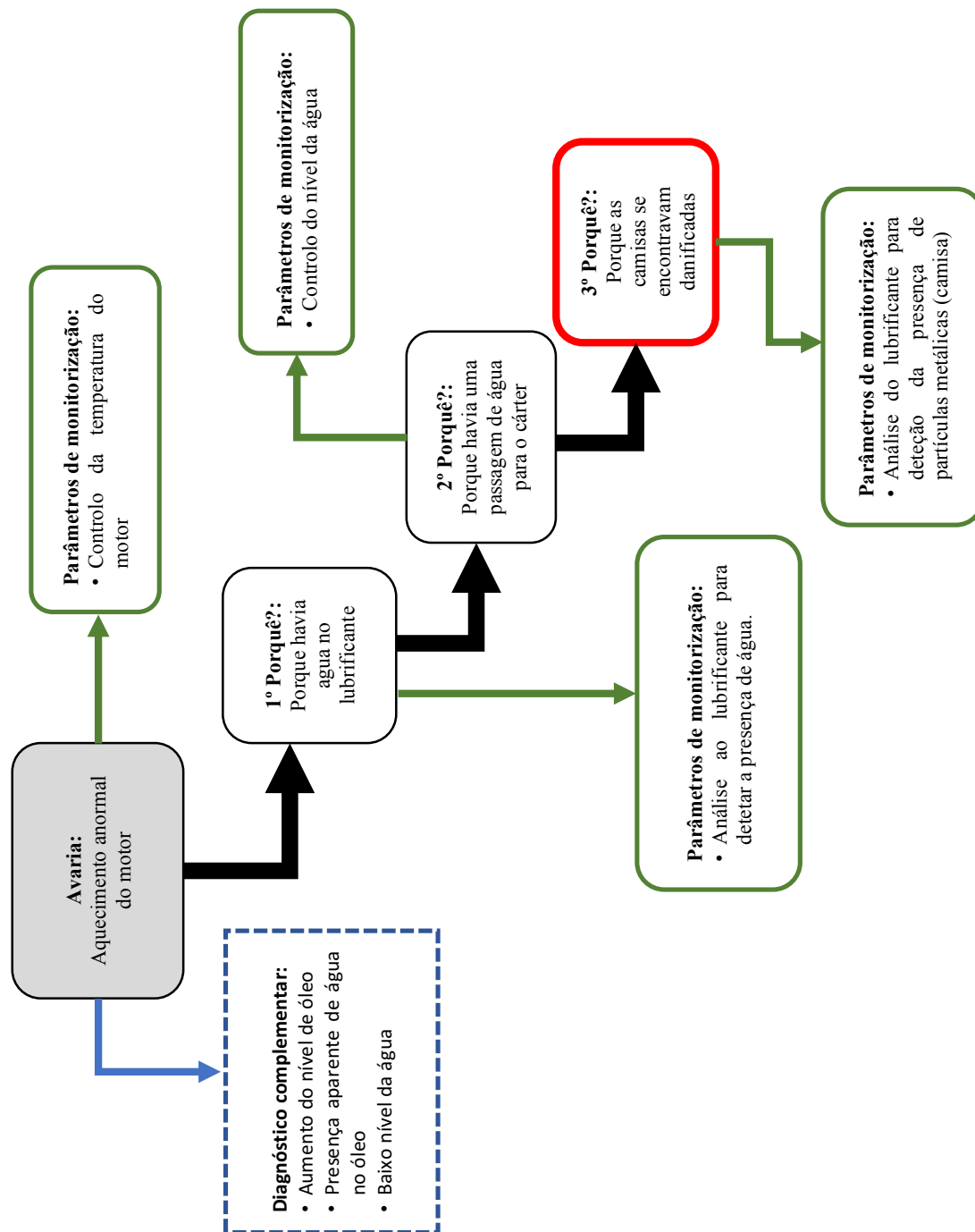
Apêndice A.6 – Método 5 P's aplicado a uma junta da cabeça queimada.



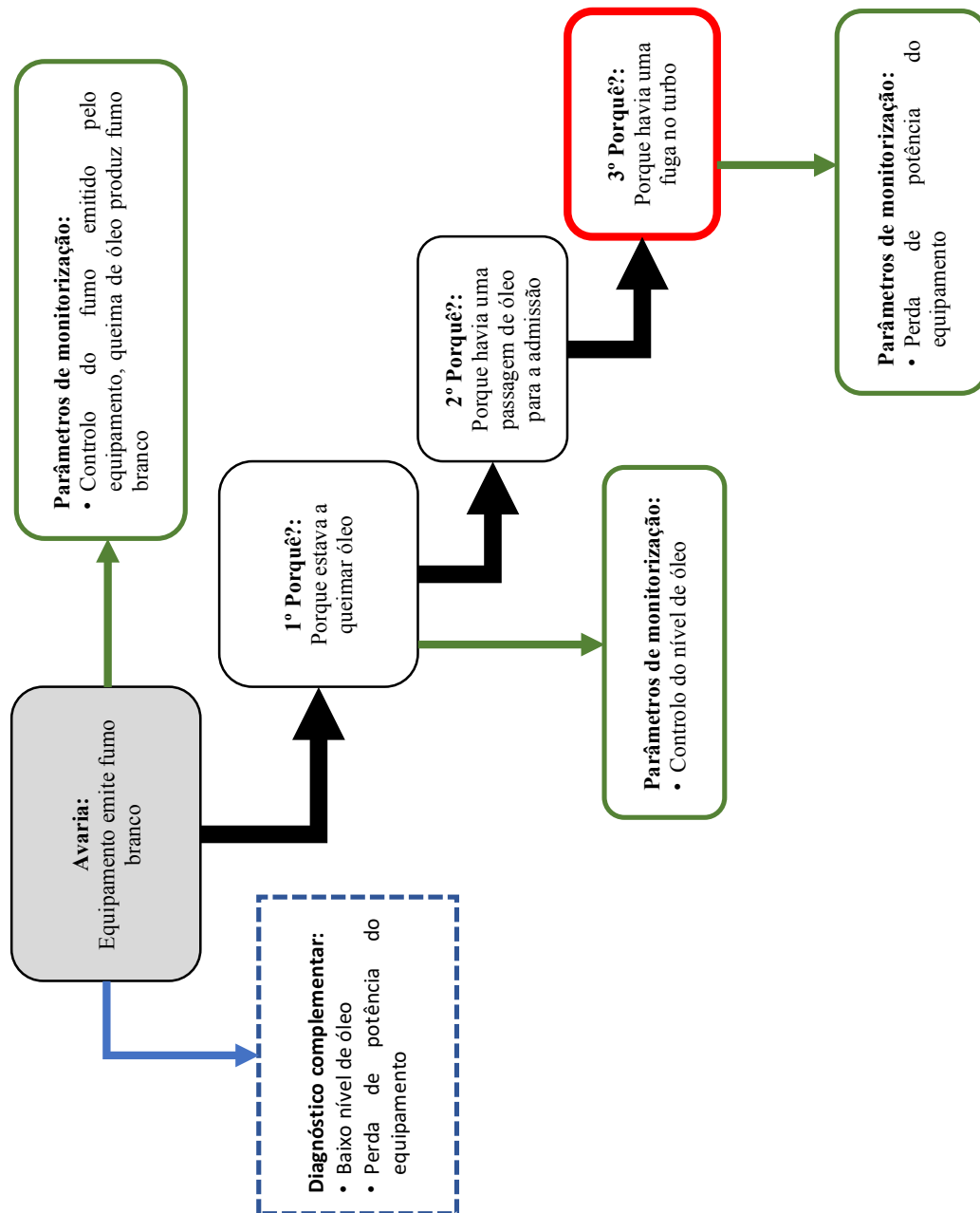
Apêndice A.7 – Método 5 P's aplicado a um injetor gripado.



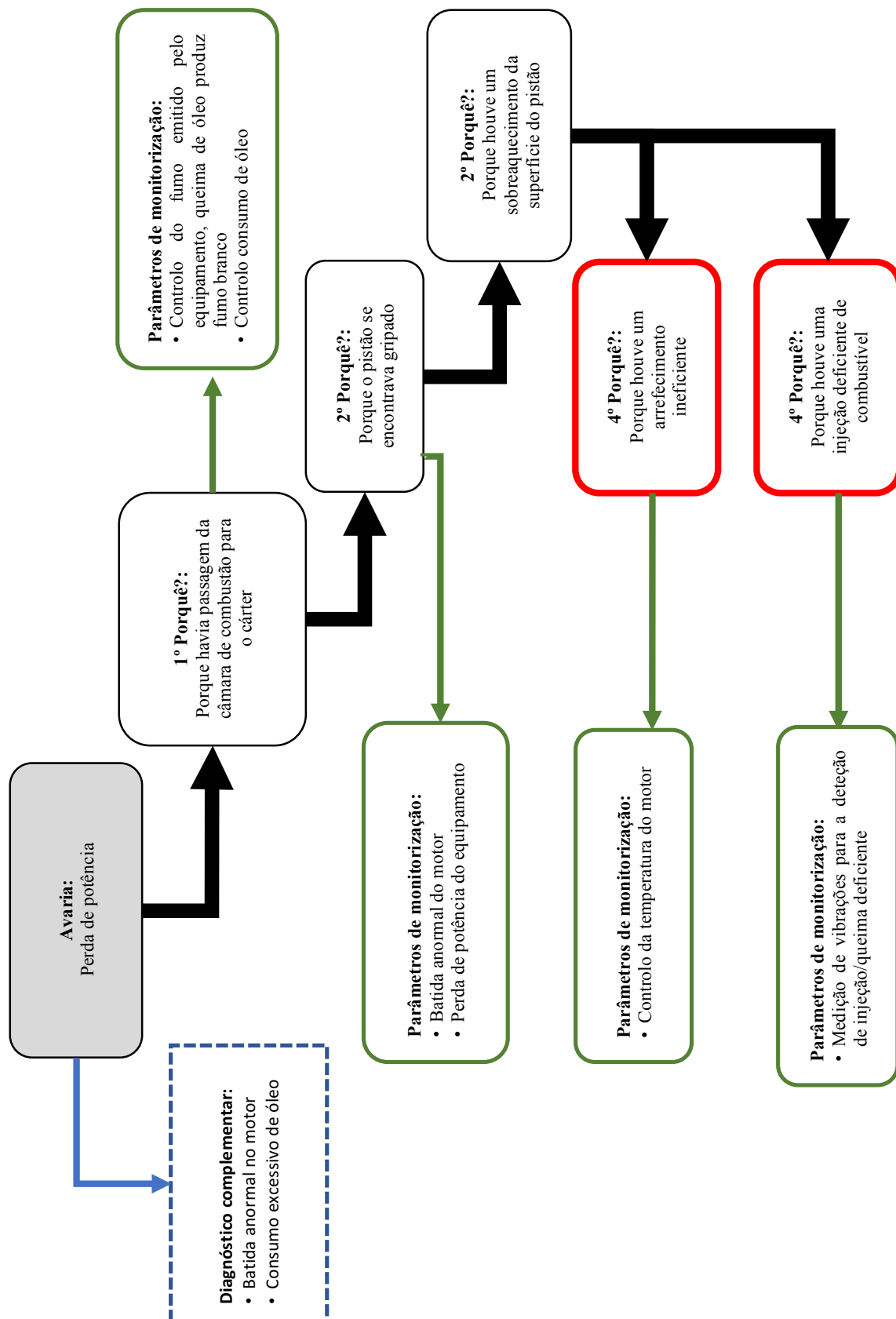
Apêndice A.8 – Método 5 P's aplicado a uma fuga num injetor.



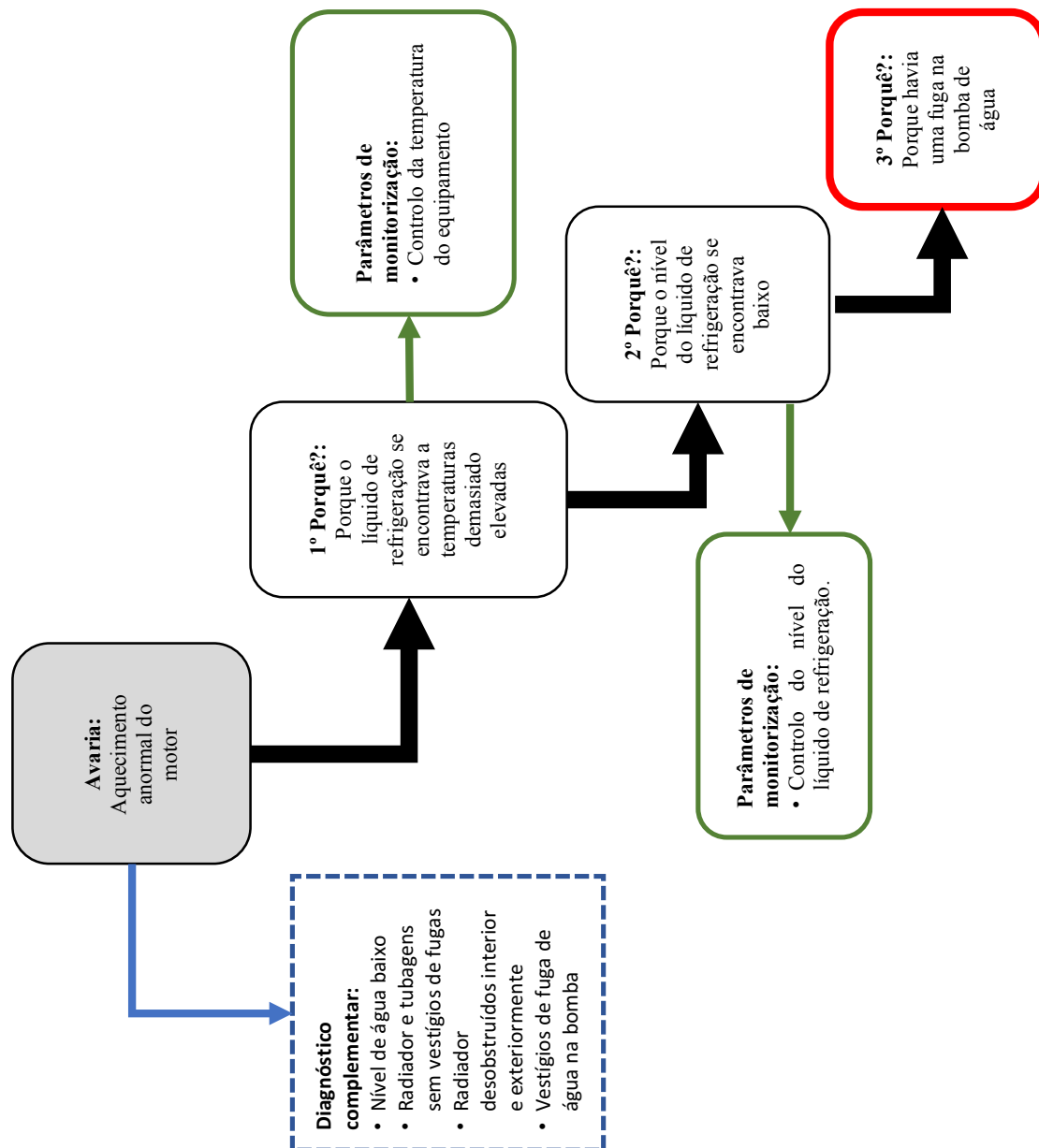
Apêndice A.9 – Método 5 P's aplicado a camisas danificadas.



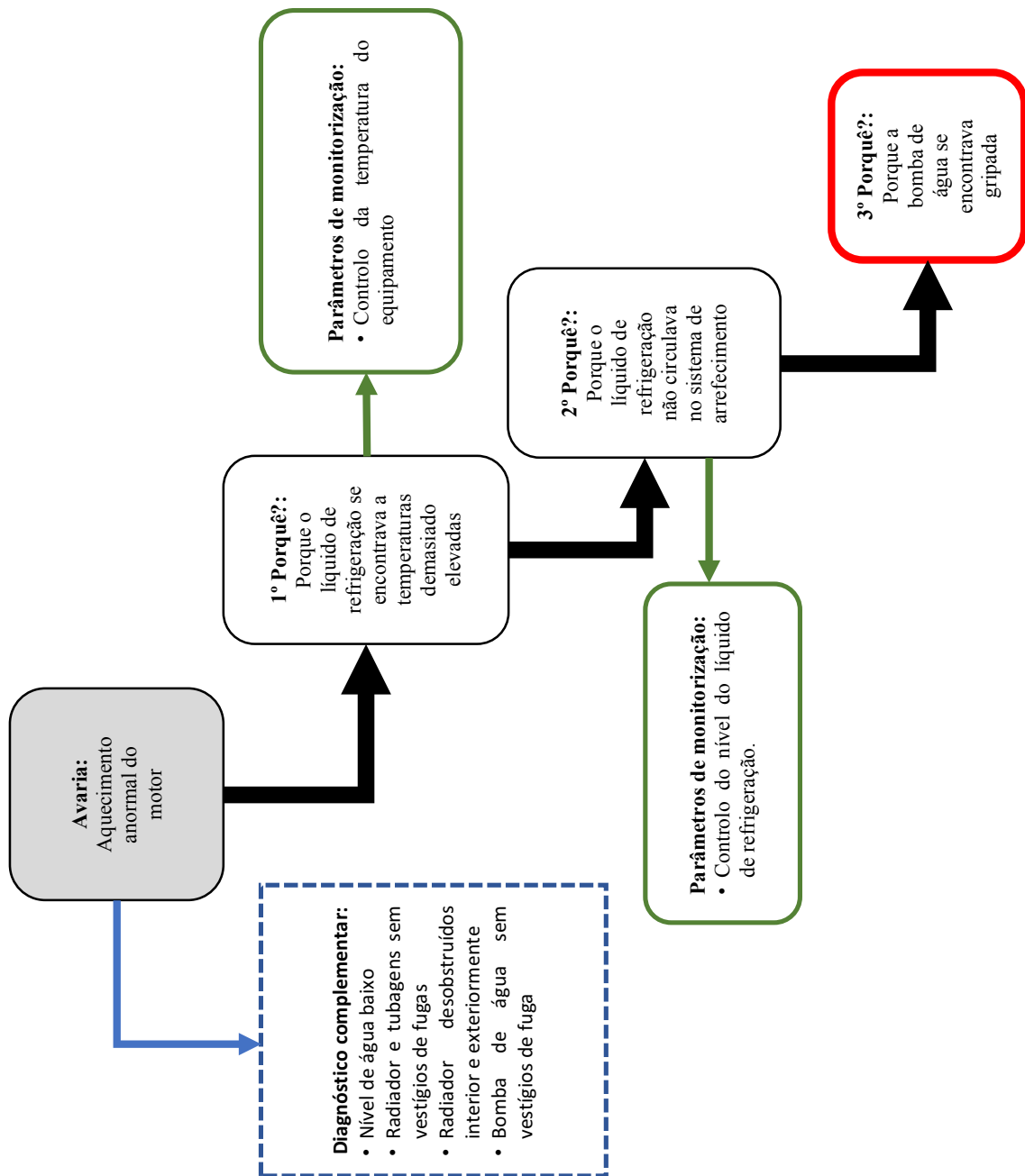
Apêndice A.10 – Método 5 P's aplicado a uma fuga no turbo.



Apêndice A.11 – Método 5 P's aplicado a um pistão gripado.



Apêndice A.12 – Método 5 P's aplicado a uma fuga na bomba de água.



Apêndice A.13 – Método 5 P's aplicado a uma bomba de água gripada.

Apêndice B – Avarias vs parâmetros de monitorização

Parâmetros de Monitorização																					
Avaria	Análise lubrificante				Outras análises			Inspeção visual sensível													
	Teor de água	Teor de combustível	Partículas	TAN	Análise Vibrações	Análise termográfica	Análise Combustível	Controlo temperatura	Nível de água	Nível de óleo	Fumo emitido	Pressão sistema de refrigeração	Batida motor	Perda potencia	Chetro a combustível	Consumo combustível	Vestígios de fuga	Entupimento exterior do radiador	Vestígios de óleo no líquido de refrigeração	Vestígios de líquido de oleo	
Bomba Injetora	Gripada				X	X	X		X												
	Fuga	X							X						X	X	X	X			
Radiador	Fuga							X	X								X				
	Entupido							X	X									X			
Segmentos	Gastos/danificados		X	X					X	X	X	X								X	
Junta da cabeça	X	X		X				X	X	X	X	X	X								
Injetores	Gripados				X	X					X			X	X	X					
	Fuga				X	X					X			X	X	X					
Camisa	Gripada/danificada	X	X					X	X	X	X										X
Turbo	Gripado		X			X								X							
	Fuga								X	X	X			X	X						
	Partido		X							X	X	X		X							
Pistão	Gripado/danificado			X				X	X	X	X	X	X	X							
Bomba de água	Fuga							X	X								X	X			
	Gripada							X	X								X	X			

Anexos

Anexo A – Exemplo de relatório impresso pelo *MicroLab*.

CITY OF SACRAMENTO				Vehicle ID: OSA				Component ID: OSADSCENTER			
Truck Make: GENERAL				Component Make: 5.3 DIESEL				Component Model: 7.3			
Truck Model: TC8				Component Model: NA				Component Year: NA			
Vehicle Year: NA				Component Year: NA				Component Type: DIESEL ENGINE			
FleetID : 10448				Sump Capacity: 30 Quarts							
Component Description:								Oil Changed			
Sample ID	Date Taken	Miles on Component	Miles on Oil	Oil Weight	Oil Brand	Oil Type	No	Date Analyzed	User Sample ID		
5853	1/20/2016	234567	15000	15W40	OSA	BLUE	No	1/20/2016			
Comments: PISTON RING AND BEARING WEAR INDICATED. POSSIBLY DUE TO THE PRESENCE OF ABRASIVE DIRT PARTICLES. HIGH SILICON (COOLANT ADDITIVE) OR DIRT PRESENT. POSSIBLY GAINING WITH THE COOLANT. CHECK FOR SOURCE OF COOLANT LEAK. CHECK FOR LOW OIL PRESSURE AND ABNORMAL NOISE. CHECK FILTER AND AIR INDUCTION SYSTEM. ADVISE USE OF ADDITIONAL DIAGNOSTIC TOOLS TO DETERMINE COURSE OF CORRECTIVE ACTION. DRAIN OIL AND CHANGE FILTER IF NOT ALREADY DONE. RESAMPLE AT 1/2 NORMAL INTERVAL TO CONFIRM.											
5852	1/20/2016	134567	10000	SAE 40	OSA	HIGH VISC	No	1/20/2016			
Comments: ANALYSIS INDICATES PROPER PERFORMANCE OF THE LUBRICANT AND UNIT. PHYSICAL PROPERTIES OF THE OIL ARE WITHIN SPECIFICATIONS. EXTENDED OIL DRAIN INTERVAL MAY BE CONSIDERED. RESAMPLE AT NEXT SERVICE INTERVAL TO ESTABLISH A TREND.											
5851	1/20/2016	123456	15000	SAE 20	SHELL	ROTELLA T	No	1/20/2016			
Comments: VISCOSITY LOWER THAN TYPICAL FOR THE GIVEN OIL TYPE. PHYSICAL PROPERTIES OF THE OIL ARE WITHIN SPECIFICATIONS. FUEL DETECTED BY IRL. BUT NOT CONFIRMED BY MEASURED VISCOSITY.											

Sample ID	Wear Metals (ppm)				Contaminant Metals (ppm)				Multi-Source Metals (ppm)				Additives (ppm)							
	Iron	Chromium	Aluminum	Copper	Lead	Tin	Vanadium	Silicon	Sodium	Potassium	Titanium	Molybdenum	Nickel	Manganese	Boron	Magnesium	Calcium	Barium	Phosphorus	Zinc
5853	54	55	55	55	57	51	X	53	57	69	X	58	X	X	X	X	X	X	X	X
5852	3	<2	<2	3	5	9	X	3	<2	<2	X	49	X	X	X	X	X	X	X	X
5851	4	<2	<2	4	<2	<2	X	<2	<2	<2	X	<2	X	X	X	X	X	X	X	X

Sample ID	Contaminants				Physical Properties			
	Fuel	Soot	Water	Glycol	Nitration	TBN	Oxidation	Visc
5853	X	X	X	X	X	X	X	Visc Mode
5852	-	<0.1	0.2	-	<2.0	8.6	<2.0	V100C Limit
5851	D	<0.1	<0.1	-	2.5	7.8	<2.0	V40C Limit

Diagnóstico declarado
e recomendações
de manutenção

**Límites de alarma
definidos por cores**

Histórico de amostras
para análise
de tendências

Anexo B – Periodicidade de testes de lubrificante em função do equipamento segundo CIMAC.

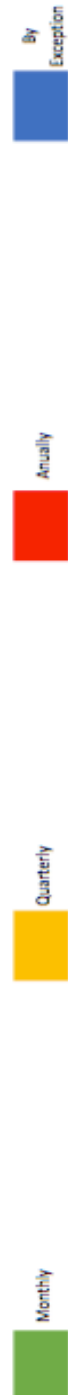
	FLUID PROPERTIES										CONTAMINATION					WEAR DEBRIS						
	Elemental Spectroscopy	Viscosity	Acid Number	Base Number	FT-IR Ox/Nox	RULER	RPVOT	Ultra-Centrifuge	Demulsibility (Water Separation)	Foaming Tendency	Rust Prevention	Resistivity	Specific Gravity	Crackle Test (KF by Exception)	Karl Fischer Water	Particle Count	Membrane Patch Colorimetry (MPC)	Fuel Dilution	Glycol Contamination	Analytical Ferrography	Ferrous Wear Concentration	Filter Debris Analysis
Compressors																						
EHC Fluids																						
Engines (Diesel)																						
Engines (Gasoline)																						
Engines (Natural Gas)																						
Gear Boxes																						
Hydraulic Oils (<200 gal reservoir)																						
Hydraulic Oils (>200 gal reservoir)																						
Turbine Oils (<200 gal reservoir)																						
Turbine Oils (>200 gal reservoir)																						

Monthly

Quarterly

Annually

By Exception



Anexo C – Plano atual de manutenção do Grupo VENDAP



FICHA DE MANUTENÇÃO GRUAS

Máquina: GR194	Nº de Folha de Obra: 1700837	Data Entrada: 08/07/17
Marca: GROVE	Modelo: GMK5220	Data Saída: 10/07/17
N.º Série: 5220 2007	Ano Fabrico: 2007	Horas Grua: _____
		Horas Camião: _____
		Quilómetros: _____

Símbolos de Análise: ✓ - Verificado; M- Mudou; R- Reparou; L- Limpou; X - Não verificado

Motor Camião a cada 500h ou 1000h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Óleo e filtros:		
Alimentação de gasóleo filtros, tubos, tanque:		
Admissão de ar filtros:		
Sistema de refrigeração: níveis, anti corrosivo, tubos, e radiador:		
Válvulas e injectores:		
Apertos e fugas gerais:		
Controladores: temperatura, pressão de óleo:		
Parecer sobre o motor:		
Bom <input type="checkbox"/>		
Anomalias: <input type="checkbox"/>		
Reparações: <input type="checkbox"/> Mudou tensor e correia, cremalheira do volante, motor de arranque reparado		
Motor Grua a cada 500 ou 1000h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Óleo e filtros:		
Alimentação de gasóleo: filtros, tubos, tanque:		
Entrada de ar: filtros:		
Sistema de refrigeração: níveis, anti corrosivo, tubos, radiador:		
Afinação das válvulas e injectores:		
Apertos e fugas gerais:		
Controladores: temperatura, pressão de óleo:		
Parecer sobre o motor:		
Bom <input type="checkbox"/>		
Anomalias: <input type="checkbox"/>		
Reparações: <input type="checkbox"/>		
Transmissão de Potência a cada 700h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Óleo da caixa transferência e diferenciais:		
Óleo da caixa velocidades torque e filtros:		
Óleo da caixa de acoplamento das bombas hidráulicas:		
Óleo dos cubos das rodas (sprocket)		
Pontos de lubrificação:		
Tubagem correspondente:		
Parecer sobre a transmissão de potência:		
Bom <input type="checkbox"/>		
Anomalias: <input type="checkbox"/>		
Reparações: <input type="checkbox"/>		

FICHA DE MANUTENÇÃO GRUAS

Símbolos de Análise: ✓ - Verificado; M- Mudou; R- Reparou; L- Limpou; X - Não verificado

Sistema de Direcção e Suspensão a cada 1400h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Lubrificação dos pontos de massa:		
Aperto e pressão de ar das rodas:		
Óleo da caixa de direcção e filtro:		
Fugas:		
Tubos flexíveis correspondentes:		
Parecer sobre o sistema de direcção e suspensão: Bom <input type="checkbox"/> Anomalias <input type="checkbox"/> Reparações <input type="checkbox"/>		
Sistema de Travagem a cada 1400h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Travões e espessura dos calços:		Calços novos 1º, 2º eixo
Sinal de STOP:		
Fugas:		
Tubos flexíveis correspondentes:		
Parecer sobre o sistema de travagem: Bom <input type="checkbox"/> Anomalias <input type="checkbox"/> Reparações: <input type="checkbox"/>		
Reservatório Hidráulico a cada 3000h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Óleo e filtro:		
Tubos flexíveis correspondentes:		
Fugas:		
Parecer sobre o reservatório hidráulico: Bom <input type="checkbox"/> Anomalias <input type="checkbox"/> Reparações: <input type="checkbox"/>		
Estabilizadores Extensões (das lagartas) a cada 1400h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Lubrificação:		
Tubos flexíveis correspondentes:		
Fugas:		
Parecer sobre os estabilizadores e extensões: Bom <input type="checkbox"/> Anomalias: <input type="checkbox"/> Reparações: <input type="checkbox"/>		
Cabina de Operação e Condução a cada 1400h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Estado geral das cabinas:		
Dispositivos de comando: alavancas, pedais, joystick, etc.:		
Parecer sobre a cabina: Bom <input type="checkbox"/> Anomalias <input type="checkbox"/> Reparações: <input type="checkbox"/>		



FICHA DE MANUTENÇÃO GRUAS

Símbolos de Análise: ✓ - Verificado; M- Mudou; R- Reparou; L- Limpou; X - Não verificado

Giratória a cada 1400h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Lubrificação:		
Óleo da caixa de giratória:		
Aperto do rolamento de giratória:		
Tubos flexíveis correspondentes:		
Parecer sobre a giratória (INCLUINDO SWIVEIS): Bom <input type="checkbox"/> Anomalias <input type="checkbox"/> Reparações: <input type="checkbox"/>		
Cadernal a cada 1400h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Lubrificação:		
Folgas, dos rolamentos cavilhas e gancho:		
Parecer sobre os cadernais e bola: Bom <input type="checkbox"/> Anomalias <input type="checkbox"/> Reparações: <input type="checkbox"/>		
Lança Jib e Fly a cada 1400h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Lubrificação:		
Alinhamento da lança:		
Calços		
Tubagem correspondente:		
Fugas:		
Parecer sobre lança Jib e Fly: Bom <input type="checkbox"/> Anomalias <input type="checkbox"/> Reparações: <input type="checkbox"/>		
Guinchos a cada 1400h		
Itens	Resultado de análise	Observações
Óleo do redutor e travão:		
Estado e lubrificação do cabo:		
Tubos flexíveis correspondentes:		
Fugas:		
Funcionalidade:		
Parecer sobre o guincho: Bom <input type="checkbox"/> Anomalias <input type="checkbox"/> Reparações: <input type="checkbox"/>		

2

278

Esta ficha de manutenção está em conformidade com o plano de manutenção do fabricante

Outros Trabalhos não Mencionados

Nº Linha	Descrição
1	SOLDADA ESCAPE
2	
3	
4	

Imputação de Mão-de-obra

Data	Nome do trabalhador	Total horas	Total KM	Nº de Imputação de Mão-de-Obra	Nº de Horas por tipo de Intervenção			
					MV	MP	MC	Nº Linh
08/10/2018	Valter	2						

MV - Verificação; MP - Manutenção Preventiva; MC - Manutenção Curativa (Reparação)

DATA: 10/03/17 Responsável: R. Santos